

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2012

Martin Novák

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

**Měření charakteristik polovodičových součástek s užitím
analyzátoru 370A a jejich následné využití pro návrh obvodu**

**Semiconductor devices characteristics measuring with
analyser 370A and their following using for circuit desing**

2012

Martin Novák

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Zadání bakalářské práce

Student:

Martin Novák

Studijní program:

B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601R013 Telekomunikační technika

Téma:

Měření charakteristik polovodičových součástek s užitím analyzátoru 370A a jejich následné využití pro návrh obvodu
Semiconductor devices characteristics measuring with analyser 370A and their following using for circuit design

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s návodem na obsluhu přístroje pro snímání voltampérových charakteristik polovodičových součástek 370A.
2. Po dohodě s vedoucím práce proveďte měření charakteristik vybraných typů součástek a z naměřených hodnot určete jejich typické parametry používané při návrhu zapojení.
3. Pro vybrané zapojení proveďte návrh hodnot součástek s užitím parametrů polovodičové součástky zjištěných analyzátozem 370A. Zapojení realizujte a experimentálně ověřte jeho parametry.

Seznam doporučené odborné literatury:

Operator manual 370A programmable curve tracer. Tokio : Sony Tektronix, 1989. 58 s.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Dr.Ing. Libor Gajdošík**

Datum zadání: 19.11.2010

Datum odevzdání: 06.05.2011

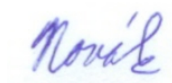
prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

„Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“



V Ostravě dne 1. 5. 2012

Martin Novák

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Dr. Ing. Liboru Gajdošíkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

Abstrakt

Bakalářská práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. První, teoretická část, je zaměřena na problematiku polovodičů. V úvodu jsou vysvětleny základní pojmy a definice. Praktická část se zabývá měřením voltampérových charakteristik Zenerovy diody a bipolárního tranzistoru pomocí analyzátoru Tektronix 370A. Následuje stanovení základních parametrů, které jsou nezbytné pro návrh daného obvodu. Cílem bylo navrhnout stejnosměrný stabilizátor napětí se Zenerovou diodou a střídavý tranzistorový zesilovač. Součástí práce je experimentální ověření navržených obvodů.

Klíčová slova

Polovodič, polovodičová dioda, Zenerova dioda, stabilizátor napětí, bipolární tranzistor, zesilovač

Abstract

The Bachelor thesis I have written is divided into theoretical and practical part. The first part – the theoretical is focused on semiconductors. In the introduction the basic concepts and definitions have been explained. The second part – the practical, deals with the measurement of current-voltage characteristics of the Zener diode and bipolar transistor with the help of Tektronix 370A analyzer. Determination of basic parameters that are necessary for the design of circuit have been followed. The aim of this Bachelor thesis was to design the DC voltage regulator with the Zener diode and the AC transistor amplifier. The part of this thesis is an experimental verification of the proposed circuits.

Key words

Semiconductor, semiconductor diode, Zener diode, voltage stabilizer, bipolar transistor, amplifier

Seznam použitých symbolů a zkratek

$^{\circ}\text{C}$ – stupeň Celsia (jednotka teploty)

0K – nula Kelvínů (jednotka teploty)

A – elektroda diody (anoda)

A1002 – adaptér pro měření tranzistorů

A1005 – adaptér pro měření diod

AC – střídavý proud, napětí

AlP – fosfid hliníku

A_u – napět'ové zesílení zesilovače

B – elektroda tranzistoru (báze)

C – elektroda tranzistoru (kolektor)

C_i – intrinzická koncentrace [m^{-3}]

C_i^* – v nepřilíš velkých teplotních rozmezích konstanta [m^{-3}]

C_p – kapacita záporně polarizovaného přechodu [F]

C_{v1}, C_{v2} – vazební kapacity zesilovače [F]

DC – stejnosměrný proud, napětí

E – elektroda tranzistoru (emitor)

E – označení hradlové vrstvy

E24, E12 – standardizované řady rezistorů

E_g – šířka zakázaného pásu [eV]

f_d – dolní mezní kmitočet [Hz]

GaAs – arsenid gália

Ge – germánium

h_{11e}, r_{BE} – vstupní odpor tranzistoru [Ω]

h_{12e} – zpětný napět'ový přenos tranzistoru

h_{21E} – statický proudový zesilovací činitel tranzistoru

h_{22e} – výstupní vodivost tranzistoru [S]

I_B – proud procházející bází [A]

I_{Bmax} – maximální dovolený proud báze [A]

I_C – proud procházející kolektorem [A]

I_{CB0} – malý proud procházející kolektorem a bází (zbytkový proud) [A]

I_{Cmax} – maximální dovolený proud kolektoru [A]

I_{CP} – proud kolektoru ve zvoleném pracovním bodě [A]

I_E – proud procházející emitorem [A]

I_F – proud diody v propustném směru [A]

InAs – arsenid india

InSb – antimonid india

I_R – proud diody v závěrném směru [A]

I_{zmax} – maximální proud Zenerovou diodou [V]

I_{zmin} – minimální proud Zenerovou diodou [V]

I_{zP1} – proud Zenerovy diody v pracovním bodě [A]

k – Boltzmannova konstanta ($1,3806505 \cdot 10^{-23} \text{JK}^{-1}$)

K – elektroda diody (katoda)

mp – mezní přímka

ms – čára mezní saturace

P_{tot} – maximální ztrátový výkon Zenerovy diody [W]

R_{B1}, R_{B2}, R_E, R_C – odpory zesilovače [Ω]

r_{CE} – výstupní odpor tranzistoru [Ω]

r_F – dynamický odpor diody v propustném směru [Ω]

R_F – statický odpor diody v propustném směru [Ω]

R_p – svodový odpor [Ω]

R_R – statický odpor diody v závěrném směru [Ω]

R_{th} – tepelný odpor [$^{\circ}\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$]

S – činitel stabilizace

SB – zapojení tranzistoru se společnou bází

SC – zapojení tranzistoru se společným kolektorem

SE – zapojení tranzistoru se společným emitorem

Si - křemík

T1, T2 – označení tranzistoru

TK_{uz} – teplotní součinitel [K^{-1}]

t_{tr} – doba zotavení diody [s]

U_{BE} – napětí báze-emitor [V]

U_{CB} – napětí kolektor-báze [V]

U_{CBmax} – maximální dovolené napětí kolektor-báze [V]

U_{cc} – stejnosměrné napájecí napětí [V]

U_{CE} – napětí kolektor-emitor [V]

U_{CEmax} – maximální dovolené napětí kolektor-emitor [V]

U_{CEP} – napětí kolektor-emitor v pracovním bodě [V]

U_D – difuzní napětí [V]

U_{EA} – Earlyho napětí [V]

U_F – propustné napětí diody [V]

U_{in} – vstupní napětí [V]

U_n – napětí varistoru, po jeho překročení dojde ke zlomu charakteristiky [V]

U_{out} – výstupní napětí [V]

U_p, U_{TO} – prahové napětí [V]

U_R – závěrné napětí diody [V]

U_{Rmax} – maximální napětí diody v závěrném směru [V]

U_z – jmenovité Zenerovo napětí [V]

U_{zP1} – napětí Zenerovy diody v pracovním bodě [V]

U_{z9} – Zenerovo napětí při teplotě vyšší než 25°C [V]

VA – voltampérová charakteristika

Θ – absolutní teplota [K⁻¹]

ϑ_a – teplota okolí [°C]

ϑ_{jmax} – maximální teplota přechodu [°C]

ϑ_s – skladovací teplota [°C]

φ_s – činitel vyhlazení

Obsah

1. ÚVOD.....	1
2. POLOVODIČE	1
2.1. Vlastní vodivost polovodičů	2
2.2. Nevlastní vodivost polovodičů	3
2.3. Přechod PN bez připojení vnějšího napětí	4
2.4. Přechod PN s připojeným vnějším napětím	5
2.4.1. Propustný směr.....	5
2.4.2. Závěrný směr	6
3. POLOVODIČOVÁ DIODA.....	7
3.1. Náhradní zapojení	8
3.2. Voltampérová charakteristika	9
3.3. Parametry	10
3.3.1. Statický odpor.....	10
3.3.2. Dynamický odpor.....	11
3.3.3. Doba zotavení.....	11
3.3.4. Ztrátový výkon diody	12
3.3.5. Kapacita diody	13
3.4. Značení diod.....	13
3.4.1. Značení podle normy „JEDEC“	14
3.4.2. Značení podle normy „Pro-Electron“	14
4. ZENEROVA DIODA	16
4.1. Teplotní závislost	17
4.2. Charakteristika	18
5. STABILIZAČNÍ OBVODY	19
5.1. Parametrické stabilizační obvody	19
5.2. Zpětnovazební stabilizační obvody.....	21

6. TRANZISTORY	22
6.1. Bipolární tranzistor	22
6.1.1. Princip činnosti	23
6.1.2. Základní zapojení bipolárního tranzistoru	24
7. ZESILOVAČE	25
7.1. Třídy zesilovačů	26
7.1.1. Zesilovač třídy „A“	26
7.1.2. Zesilovač třídy „B“	27
7.1.3. Zesilovač třídy „AB“	27
7.1.4. Zesilovač třídy „C“	28
7.2. Stejnoseměrný zesilovač	28
7.3. Střídavý zesilovač	29
8. TEKTRONIX 370A	31
8.1. Parametry	31
8.2. Popis tlačítek	32
8.2.1. Display	32
8.2.2. Step generator	33
8.2.3. Collector supply	34
8.2.4. Memory, Setup	35
8.2.5. Gpib, Acq mode, Measurement	35
8.2.6. Aux, Cursor, Position	36
8.2.7. Ostatní tlačítka a ovládací prvky	37
8.3. Příprava k měření	38
8.4. Měření charakteristik bipolárního tranzistoru	39
8.4.1. Výstupní charakteristika	39
8.4.2. Vstupní charakteristika	40
8.5. Měření charakteristiky Zenerovy diody	40
8.6. Uložení na pružný disk	41
9. URČENÍ PARAMETRŮ BIPOLÁRNÍHO TRANZISTORU	42
9.1. Výstupní vodivost	42
9.2. Vstupní odpor	45

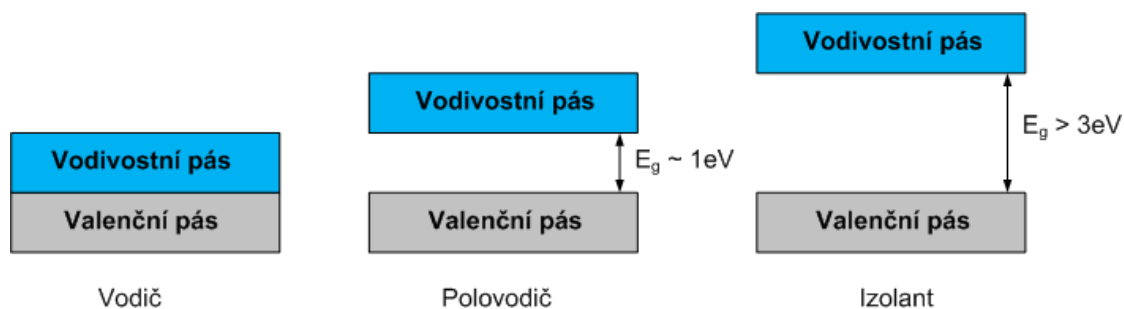
9.3.	Proudový zesilovací činitel a zpětný napěťový přenos.....	47
10.	NÁVRH ZESILOVAČE	48
10.1.	Experimentální ověření	50
10.2.	Ověření v programu Multisim	51
11.	ROZBOR ZENEROVY DIODY.....	53
12.	NÁVRH STABILIZÁTORU NAPĚTÍ.....	56
12.1.	Stabilizátor bez zatěžovacího rezistoru R_L	58
12.2.	Stabilizátor se zatěžovacím rezistorem R_L	59
12.3.	Experimentální ověření	60
12.4.	Ověření v programu Multisim	61
13.	ZÁVĚR	62
14.	LITERATURA	64

1. Úvod

Polovodiči se zabývali vědci již ve 30. letech minulém století, kdy také vznikla tzv. pásmová teorie. Ta umožnila vysvětlit vlastnosti a chování polovodičových materiálů. Cílem mé práce bylo zjistit parametry a vlastnosti vybraných polovodičových součástek a pomocí přístroje Tektronix 370A změřit voltampérové charakteristiky bipolárního tranzistoru a Zenerovy diody. Parametry zjištěné z voltampérových charakteristik byly podkladem pro návrh elektronických obvodů, které byly následně na laboratorním pracovišti prakticky odzkoušeny. V teoretické části jsem se zaměřil na polovodiče a definice základních pojmů s nimi souvisejících. Další část práce jsem věnoval polovodičové diodě, Zenerově diodě, stabilizátorům napětí, bipolárnímu tranzistoru a tranzistorovým zesilovačům.

2. Polovodiče

Polovodiče patří mezi pevné látky. Pevné látky se v elektrotechnice rozdělují podle elektrické vodivosti na elektricky vodivé materiály a izolanty. Elektricky vodivé materiály dělíme na vodiče a polovodiče. Vodivost závisí na šířce zakázaného pásu. Pro překonání zakázaného pásu je potřeba dodat elektronům energii. Čím méně energie je potřeba, tím je materiál lepším vodičem elektrické energie. Pokud je šířka zakázaného pásu E_g větší jak 3eV, jedná se o izolant (Obr. 2.1). Chování polovodičů se dá ovlivnit změnou teploty. [6]



Obr. 2.1: Rozdělení pevných látek podle šířky zakázaného pásu

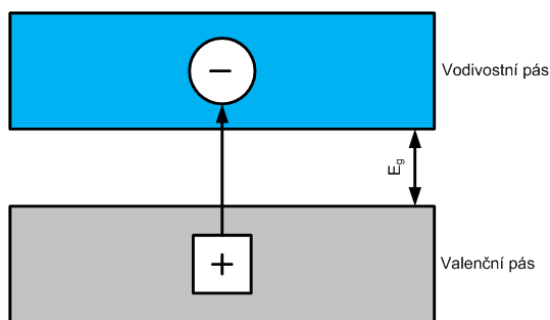
Pro výrobu polovodičů se používají prvky ze 4. skupiny Mendělejevovy periodické soustavy prvků. Všechny prvky mají čtyři elektrony ve valenční sféře (čtyřmocné prvky). Nejpoužívanějšími prvky jsou křemík a germanium. Také se používají některé sloučeniny. Porovnání hodnot energie zakázaných pásů různých materiálů najdeme v tab. 2. 1. [6]

Materiál	Energie zakázaného pásu E_g
-	[eV]
Ge	0,66
Si	1,11
GaAs	1,42
InAs	0,36
InSb	0,17
AlP	2,45

Tab. 2.1: Přehled energií zakázaných pásů pro různé polovodičové materiály

2.1. Vlastní vodivost polovodičů

Při teplotě vyšší 0K dostávají elektrony tepelnou energii, v důsledku toho dojde k překonání zakázaného pásu. Elektron přeskóčí z valenčního pásu do vodivostního (Obr. 2.1.1). Ve valenčním pásu vzniknou neobsazené hladiny (díry), které mohou být obsazeny elektrony z nižších hladin. Díra vykazuje kladný elektrický potenciál. Pokud se atom příliš přiblíží k díře, uvolní se elektron z jeho vazby a zaplní díru. Elektrony se pohybují v mřížce neuspořádaně a neustále přeskakují mezi dírami. Přeskakování se jeví jako pohyb děr. Tento proces se nazývá rekombinace. [6]



Obr. 2.1.1: Vznik díry

V čistém polovodiči nemohou být jiné nosiče náboje, pouze nosiče náboje z materiálu polovodiče. Tento stav označujeme jako intrinzický a vodivost čistého polovodiče jako vodivost vlastní. Koncentrace volných elektronů je stejná jako koncentrace děr. Intrinzickou koncentraci značíme C_i a platí vztah. [6]

$$C_i = C_i^* \exp\left(-\frac{E_g}{2k\Theta}\right) \quad (1)$$

$C_i^* = \text{konstanta}$

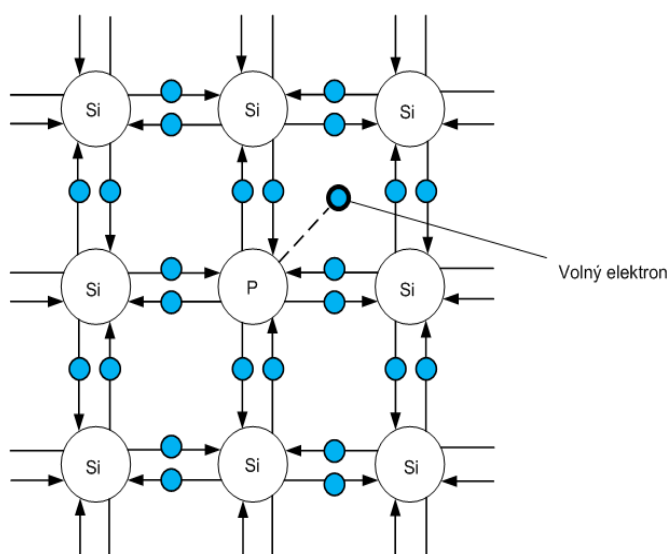
$E_g = \text{šířka zakázaného pásu (aktivační energie)}$

$k = \text{Boltzmannova konstanta}$

$\Theta = \text{absolutní teplota}$

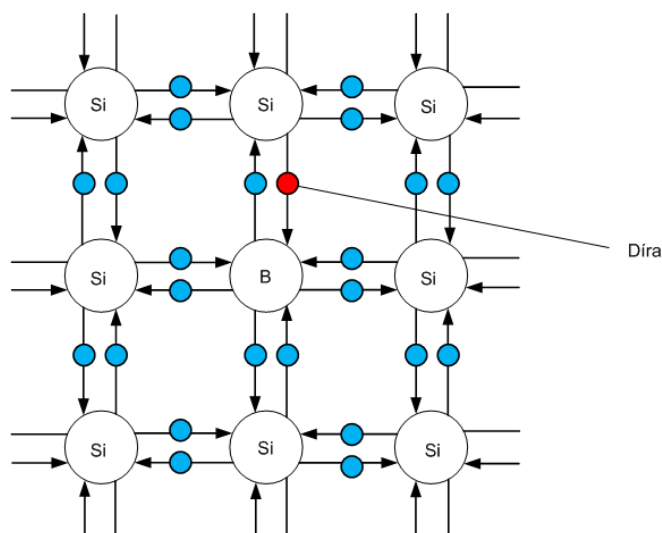
2.2. Nevlastní vodivost polovodičů

Nevlastní vodivost je způsobena příměsí pětimocného prvku do struktury čtyřmocného prvku. V našem případě je jeden atom křemíku nahrazen atomem fosforu (Obr. 2.2.1). Fosfor má pět valenčních elektronů, tudíž jeden elektron je „volný“. Proto dojde k jeho uvolnění, a to bez vzniku díry. Polovodič dotovaný takovou příměsí je polovodič typu N. [6]



Obr. 2.2.1: Polovodič typu N

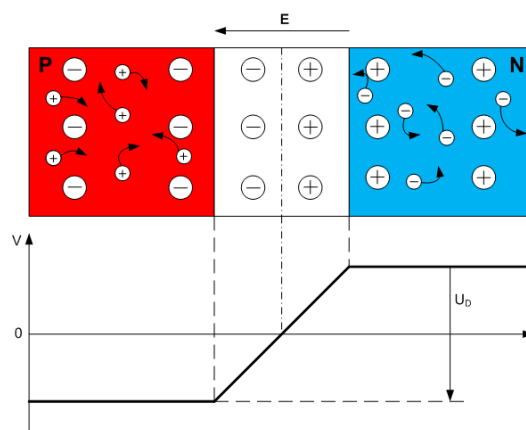
Jiný případ nastane, když atom křemíku nahradíme atomem bóru (Obr. 2.2.2). Ten má jen tři valenční elektrony, takže jedna vazba je neobsazená. Neobsazená vazba má charakter kladného nosiče náboje (díry). Prvky způsobující děrovou vodivost se nazývají akceptory. Jimi dotovaný polovodič je polovodič typu P. [6]



Obr. 2.2.2 : Polovodič typu P

2.3. Přechod PN bez připojení vnějšího napětí

Přechod PN je místo, kde se mění vodivost typu P na vodivost typu N. Elektrony přechází z materiálu s vodivostí typu N do vodivosti typu P. Ovlivňujícím faktorem je pohyb elektronů a zvyšující se teplota. Popsaný děj se nazývá difuzí. Elektrony přecházejí z vodivosti typu N do vodivosti typu P pouze tehdy, pokud nacházejí volné díry. Volné díry přecházejí z oblasti P do N pouze tehdy, pokud nacházejí dostatečný počet volných elektronů. V blízkosti rozhraní dochází k rekombinaci elektronů a děr. Následkem difuze vzniká na obou stranách zóna, kde nejsou téměř žádní nositelé náboje. Tato zóna má daleko menší vodivost než materiály s vodivostí typu P a typu N. Vodivost zóny se pohybuje od 1 až do 5 μm . Lze ji také pojmenovat jako hradlovou vrstvu. Na obr. 2.3.1 je tato hradlová vrstva označena písmenem E . Vlivem difuze vzniká difuzní napětí U_D , které nelze přímo změřit, ale můžeme je nepřímou určit. Difuzní napětí se vykompenzuje vnějším napětím stejné velikosti a opačné polarity. Kompenzační napětí se nazývá prahové napětí. [1,2]

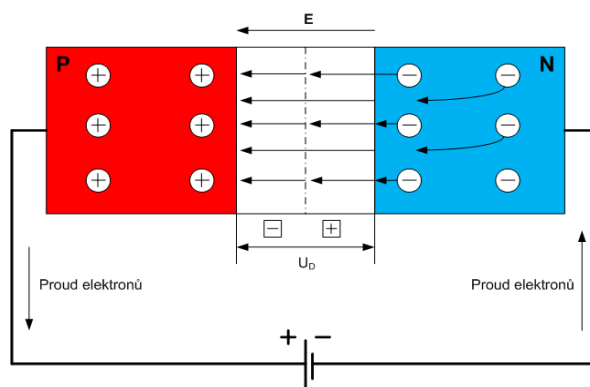


Obr. 2.3.1: Přechod PN bez vnějšího napětí

2.4. Přechod PN s připojeným vnějším napětím

2.4.1. Propustný směr

Záporný pól vnějšího zdroje napětí je připojen k materiálu s vodivostí typu N a kladný pól k materiálu s vodivostí typu P. Vznikne tak elektrické pole, které způsobí, že volné elektrony putují z oblasti N a díry z oblasti P k hradlové vrstvě. Pronikají až do hradlové vrstvy, čímž se šířka této oblasti zmenší. Velké vnější napětí může tuto vrstvu téměř odstranit. V propustném směru působí vnější napětí proti difuznímu (Obr. 2.4.1.1). Po zkompenzování difuzního napětí vnějším napětím může přechodem PN protékat proud. [1,2]

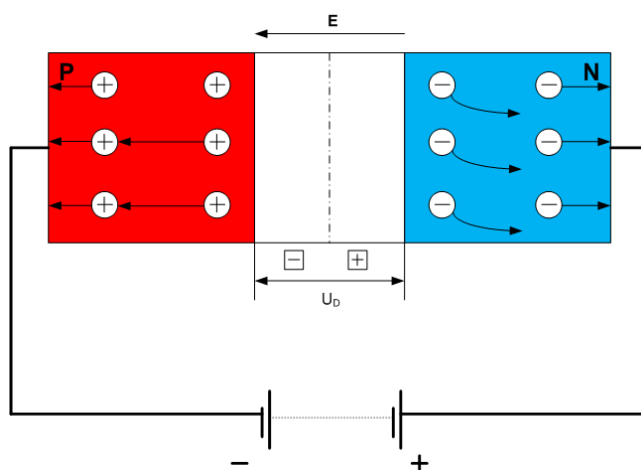


Obr. 2.4.1.1: Přechod PN v propustném směru

2.4.2. Závěrný směr

Kladný pól vnějšího zdroje napětí je připojen k materiálu typu N a záporný k materiálu typu P (Obr. 2.4.2.1). Vznikne elektrické pole, které způsobí, že volné elektrony se pohybují z oblasti N ke kladnému pólu vnějšího zdroje a díry z oblasti P k zápornému pólu zdroje. Šířka hradlové vrstvy se zvětší, protože volné náboje putují pryč od hranic PN přechodu. Z tohoto důvodu nemůže protékat proud. Vznikají pohyblivé díry a pohyblivé elektrony. Označují se jako minoritní (menšinová) nositelé náboje.

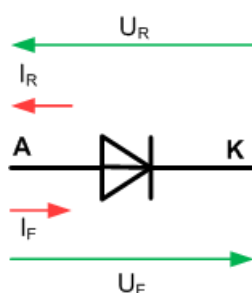
Pokud připojíme vnější zdroj napětí, začnou minoritní nositelé náboje putovat hradlovou vrstvou a způsobí malý průtok proudu, který nazýváme proud v závěrném směru. Přechod PN se v závěrném směru chová jako kondenzátor. Této vlastnosti se využívá u kapacitních diod. [1,2]



Obr. 2.4.2.1: Přechod PN v závěrném směru

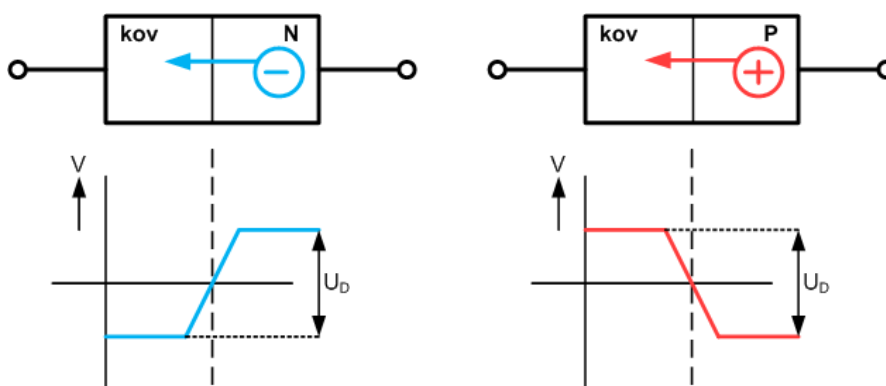
3. Polovodičová dioda

Polovodičová dioda je elektronická součástka, která obsahuje jeden PN přechod nebo Schottkyho kontakt polovodič - kov. Toto spojení může mít podobně jako přechod PN usměrňovací schopnost nebo pouze odporový charakter. Pro vytvoření dobrého Schottkyho kontaktu je důležité, aby byla malá koncentrace příměsí v polovodiči a povrch nebyl mechanicky poškozen. Polovodičová dioda se skládá ze dvou elektrod (anoda, katoda). Schematickou značku diody najdeme na obr. 3. 1. [2]



Obr. 3.1: Schematická značka diody s orientací napětí a proudů

Schottkyho pravidlo: Volné nosiče náboje se snadněji pohybují z polovodiče do kovu než z kovu do polovodiče. Při styku s kovem polovodič typu N ztrácí elektrony a získává kladný potenciál. Polovodič typu P ztrácí díry a získává záporný potenciál (Obr. 3. 2). [2]

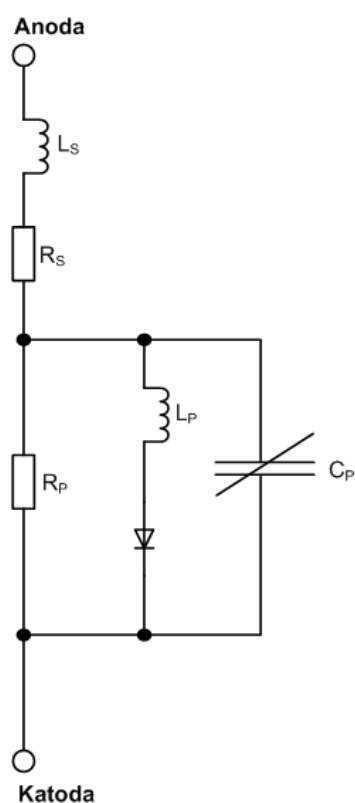


Obr. 3.2: Schottkyho pravidlo

3.1. Náhradní zapojení

Obvod R_p a C_p (Obr. 3.1.1) nahrazuje PN přechod. Odpor R_s představuje odpor zbývajících polovodičového materiálu (mimo PN přechod) a odpor přívodů. Při vysokých frekvencích zhoršuje kapacita C_p usměrňovací účinek diody. Kapacita umožňuje přechod vysokofrekvenčního proudu i přes uzavřený PN přechod nebo přechod polovodič - kov. Frekvence, při které se reaktance kapacity přechodu polarizovaném v závěrném směru rovná hodnotě odporu R_p , se nazývá hraniční frekvence diody. Podle konstrukce diody se hraniční frekvence pohybuje od stovek kHz až po několik desítek GHz. [2]

$$R_p = \frac{1}{\omega \cdot C_p} \quad (2)$$



R_s – odpor polovodičového materiálu

L_s – indukčnost pouzdra diody a přívodů

R_p – svodový odpor způsobený poruchami v PN přechodu

L_p – indukčnost přechodu PN polarizovaného v propustném směru.

C_p – kapacita závěrně polarizovaného přechodu PN

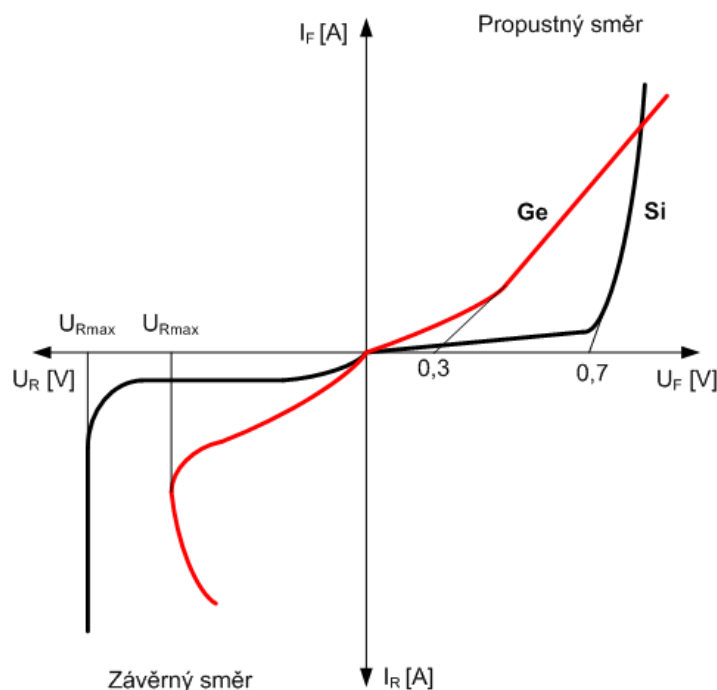
Obr. 3.1.1: Náhradní elektrické schéma diody

3.2. Voltampérová charakteristika

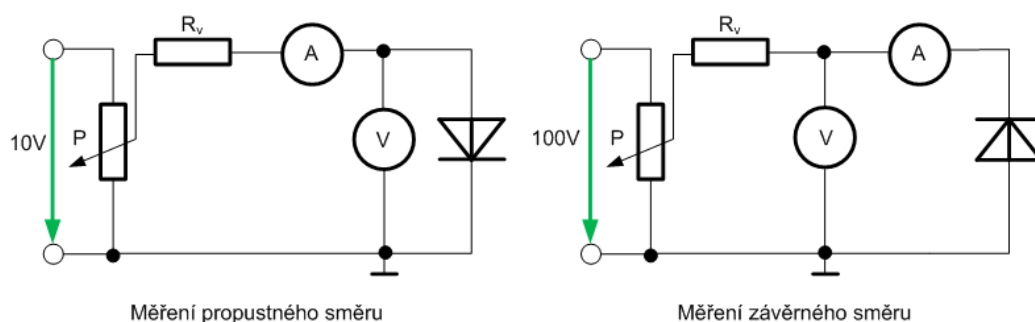
Obr. 3.2.1 zobrazuje voltampérovou charakteristiku křemíkové a germaniové diody. Dioda je zapojena v propustném směru, pokud je kladný pól zdroje připojen na anodu. V propustném směru začíná diodou protékat proud, jestliže překoná napětí U_F hodnotu difuzního napětí. Toto místo se nazývá prahové napětí U_p nebo také U_{TO} . Za hranicí prahového napětí dochází k velkému nárůstu proudu I_F . U germaniové diody narůstá proud pozvolněji. [1,2]

Pokud chceme, aby dioda pracovala v závěrném směru, musíme připojit kladný pól zdroje na katodu. U polovodičových diod nesmíme překročit maximální dovolené závěrné napětí U_{Rmax} , protože by došlo ke zničení diody. [1,2]

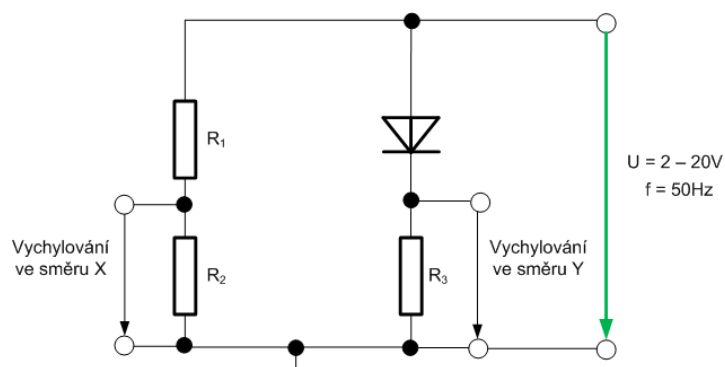
Charakteristika diody se měří pomocí statické nebo dynamické metody. Statická metoda je měření bod po bodu, pomocí ampérmetru a voltmetru v obvodu (Obr. 3.2.2). Dynamická metoda měření se provádí pomocí osciloskopu, kde je charakteristika zobrazena na stínítku (Obr. 3.2.3). [1,2]



Obr. 3.2.1: Voltampérová charakteristika křemíkové a germaniové diody



Obr. 3.2.2: Statická metoda měření charakteristiky diody



Obr. 3.2.3: Dynamická metoda měření charakteristiky diody

3.3. Parametry

3.3.1. Statický odpor

Statický odpor závisí na poloze pracovního bodu. Pro každý pracovní bod charakteristiky je statický odpor jiný. V propustném směru je statický odpor do hodnoty prahového napětí velký a za zlomem charakteristiky velmi malý. V závěrném směru se statický odpor mění velmi málo. V obou směrech se výpočet provádí stejným způsobem, mění se pouze indexování (R_F , R_R). [2]

$$R_F = \frac{U_F}{I_F} \quad (3)$$

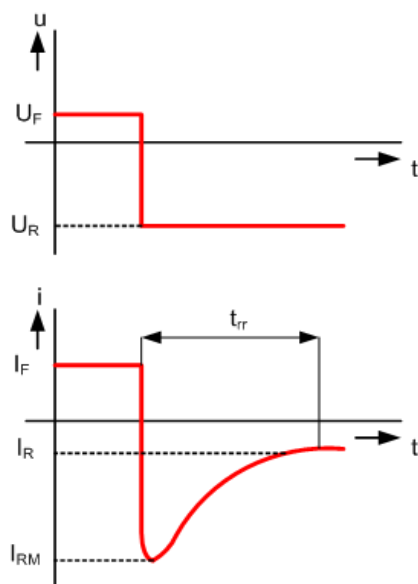
3.3.2. Dynamický odpor

Dynamický odpor je velikost odporu otevřené diody pro malý střídavý proud. Určí se ze změny proudu ΔI_F způsobenou změnou napětí ΔU_F pro konkrétní pracovní bod. V propustném směru se s rostoucím proudem dynamický odpor zmenšuje. [2]

$$r_F = \frac{\Delta U_F}{\Delta I_F} \quad (4)$$

3.3.3. Doba zotavení

Doba zotavení je doba, za kterou dioda po změně polarity anodového napětí obnoví svoji izolační schopnost. Její trvání závisí na materiálu a technickém provedení diody. Na obr. 3.3.3.1 je zobrazena fáze přechodu diody z propustného do závěrného směru. Z obrázku je patrné, že na diodě je po krátkou dobu velký výkon, který může diodu zničit. Doba zotavení značíme t_{rr} . Diody s krátkou dobou zotavení se nazývají rychlé spínací diody. Jejich doba zotavení se pohybuje do 1nS. [1,2]



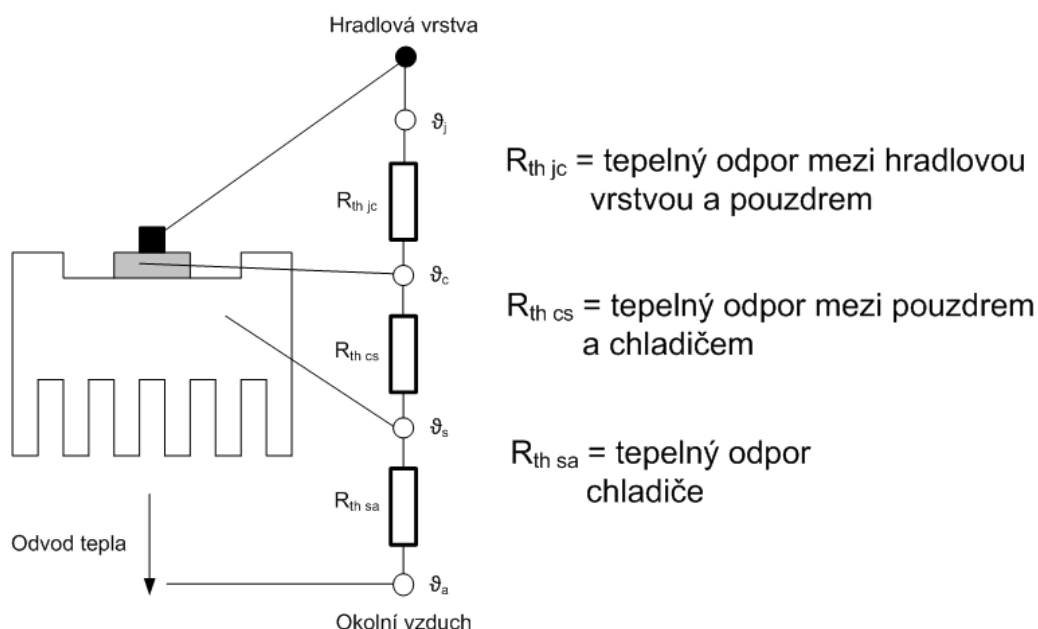
Obr. 3.3.3.1: Doba zotavení

3.3.4. Ztrátový výkon diody

Za ztrátový výkon je považován výkon, který se v hradlové vrstvě diody mění v teplo. Teplo se pouzdrům odvede do okolního vzduchu. Pouzdra se vyrábějí z kovu, plastu a skla. Čím větší je rozdíl teplot hradlové vrstvy a teploty okolního vzduchu, tím je odvádění tepla lepší. Tepelný odpor R_{th} uvádí, jak dobře se teplo z hradlové vrstvy odvádí do okolního vzduchu. U diod se ztrátovým výkonem do 1W postačuje odvádění tepla povrchem pouzdra. [2,3]

$$R_{th} = \frac{\vartheta_{jmax} - \vartheta_a}{P_D} \quad (5)$$

Pokud je ztrátový výkon větší jak 1W, používá se přídatné chlazení. Přídatným chlazením myslíme žebrované profily, které se vyrábí z mědi, hliníku nebo oceli. Pokud bude dioda opatřena tímto přídatným chlazením, tak tepelný odpor R_{th} bude složen ze tří sériově řazených odporů (Obr. 3.3.4.1). [1]

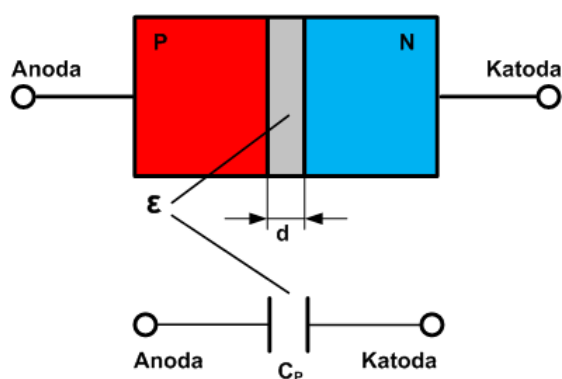


Obr. 3.3.4.1: Náhradní schéma tepelného odporu s chladičem

3.3.5. Kapacita diody

V blízkosti PN přechodu vzniká vlivem elektrostatického pole tzv. vyprázdňená oblast (Obr. 3.3.5.1). Tato oblast se chová jako izolační vrstva, která odděluje vodivost typu P od vodivosti typu N. Dioda tak připomíná rovinový kondenzátor. Podle velikosti přechodu je kapacita kondenzátoru jednotky až desítky pF. Změnou anodového napětí se bude měnit tloušťka vyprázdňené oblasti a tím i kapacita diody. Současně se bude měnit odpor vyprázdňené oblasti. [2]

$$C_p = \epsilon \cdot \frac{S}{d} \quad (6)$$



Obr. 3.3.5.1: Kapacita PN přechodu

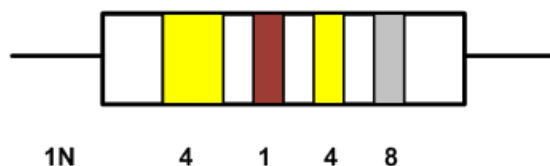
3.4. Značení diod

Při označování typů polovodičových diod používají evropští výrobci převážně typový klíč „Pro-Electron“, američtí výrobci typový klíč „JEDEC“. Oba způsoby využívají kombinaci čísel a písmen. Malé diody se označují barevnými proužky, protože písmena a čísla by byla špatně čitelná. [1]

3.4.1. Značení podle normy „JEDEC“

Typový klíč „JEDEC“ má jednu velkou nevýhodu. Z označení diody není patrné, o jaký druh diody se jedná a pro jaké použití je určena. Typové značení se skládá z „1N“ a čtyřmístného čísla. Údaj „1N“ říká, že dioda obsahuje jeden PN přechod. Následuje čtyřmístné číslo, které je na pouzdru vytisknuto nebo zadáno barevnými proužky. První proužek je dvojnásobně široký a je jím označen vývod katody. [1]

černá	≅	0	zelená	≅	5
hnědá	≅	1	modrá	≅	6
červená	≅	2	fialová	≅	7
oranžová	≅	3	šedá	≅	8
žlutá	≅	4	bílá	≅	9



Obr. 3.4.1.1: Příklad barevného značení diody 1N4148

3.4.2. Značení podle normy „Pro-Electron“

U normy „Pro-Elektron“ jsou diody dále rozříděny. První písmeno udává materiál, ze kterého je dioda vyrobena. Druhé písmeno vyznačuje hlavní funkci a třetí poukazuje na průmyslové využití. Po písmenech následují číslice. [1]

První písmeno

A = germanium;
B = křemík.

Druhé písmeno

- A = všeobecné usměrňování malých signálů, spínací dioda;
- B = kapacitní dioda;
- E = tunelová dioda;
- G = oscilátorové diody pro vysokofrekvenční použití;
- H = dioda, jež reaguje na magnetické pole;
- X = dioda pro násobiče;
- Y = výkonová dioda pro síťové usměrňovače;
- Z = Zenerova dioda, referenční dioda.



Obr. 3.4.2.2: Příklad barevného značení diody BAY93

Široké barevné proužky		Úzké barevné proužky
hnědá = AA	bílá = Z	černá = 0
červená = BA	šedá = Y	hnědá = 1
	černá = X	červená = 2
	modrá = W	oranžová = 3
	zelená = V	žlutá = 4
	žlutá = T	zelená = 5
	oranžová = S	modrá = 6
		fialová = 7
		šedá = 8
		bílá = 9

Tab. 3.4.2.1: Barevné značení dle normy „Pro-Elektron“

4. Zenerova dioda

U Zenerovy diody leží pracovní bod v oblasti průrazného napětí. Toto napětí je závislé na teplotě a dioda se do obvodu zapojuje v závěrném směru. Zenerovo napětí se udává v katalogu pro určitou hodnotu proudu v závěrném směru. Zenerovy diody se vyrábí v rozmezí od 2,4V až do 200V. Podle velikosti Zenerova napětí rozlišujeme dva fyzikální jevy. Zhruba do hodnoty Zenerova napětí 6V mluvíme o Zenerovu jevu. Od hodnoty Zenerova napětí 6V mluvíme o lavinovém jevu. [1,8]



Obr. 4.1: Schematická značka Zenerovy diody

Zenerův jev

Zenerův jev je také nazýván jako jev tunelový. U těchto diod je PN přechod velmi úzký. Elektron překoná energetickou bariéru, i když má energii nižší, než představuje bariéra. Bariéra představuje šířku zakázaného pásu E_g . Vytvoří se pár elektron - díra, což způsobí zvětšení závěrného proudu. S rostoucí teplotou se zmenšuje šířka zakázaného pásu. [4]

Lavinový jev

Lavinový jev nastane při závěrné polarizaci diody. Dochází k rozšiřování závěrné vrstvy, a to při zvyšování závěrného napětí. Elektrony jsou urychlovány silným elektrickým polem. Nastane kolize s atomy křemíku a dojde k „vyražení“ valenčních elektronů (nárazová ionizace). Vznikne pár elektron - díra. [4]

V katalogu najdeme stejné mezní hodnoty jako u usměrňovacích diod (ϑ_{jmax} , P_{tot} , I_{Fmax} , R_{th} , ϑ_S).

4.1. Teplotní závislost

Se zvýšením teploty u Zenerových diod s $U_z < 6V$, dojde ke zvětšení počtu emisí, protože vzniká silné elektromagnetické pole. Tyto diody mají záporný teplotní součinitel. U Zenerových diod s $U_z > 6V$ se střední volná dráha nositelů náboje zmenšuje. Teplotní součinitel je kladný. Vlivem teploty se tedy mění hodnota Zenerova napětí. Vzniklou změnu můžeme popsat následujícím vztahem. [1]

$$U_{z\theta} = U_z + U_z \cdot TK_{UZ} \cdot \Delta T = U_z \cdot (1 + TK_{UZ} \cdot \Delta T) \quad (7)$$

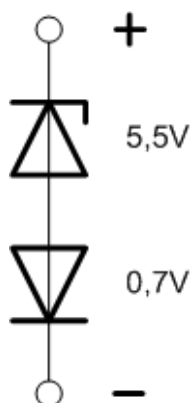
$U_{z\theta}$ – Zenerovo napětí při teplotě vyšší než $25^\circ C$

U_z – jmenovité napětí Zenerovy diody

TK_{UZ} – teplotní součinitel

ΔT – změna teploty

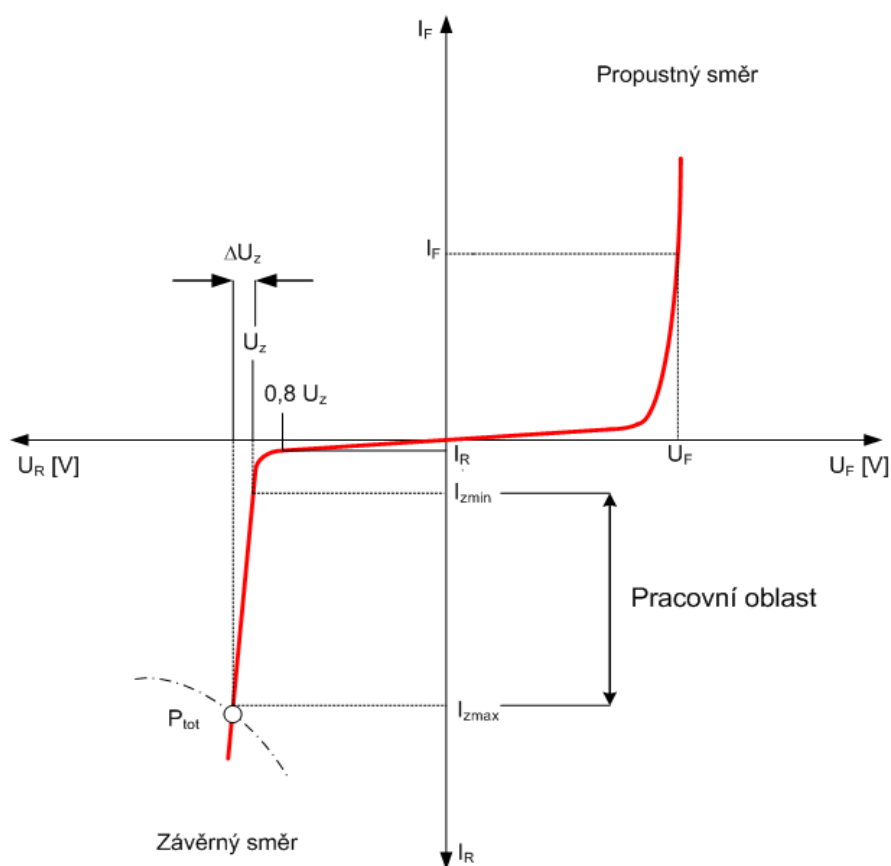
Existují referenční diody, které mají dva nebo více PN přechodů zařazených do série. Používají se tam, kde jsou vysoké nároky na teplotní nezávislost. Jeden přechod je zapojen v závěrném směru a zbylé přechody v propustném směru. Zenerovo napětí je pak téměř nezávislé na teplotě. [1]



Obr. 4.1.1: Příklad realizace referenční diody

4.2. Charakteristika

V propustném směru se průběh charakteristiky neliší od běžné polovodičové diody. Jakmile dojde k překročení proudu v propustném směru I_F , charakteristika začne prudce stoupat, proto musí být proud v propustném směru omezen předřadným odporem. V závěrném směru dochází k nedestruktivnímu průrazu. Důležitý je maximální přípustný proud Zenerovou diodou v závěrném směru I_{Zmax} . Spolu s hyperbolou ztrátového výkonu P_{tot} udávají maximální napětí na Zenerově diodě. Po překročení těchto mezních hodnot může dojít ke zničení Zenerovy diody. [1]



Obr. 4.2.1: Voltampérová charakteristika Zenerovy diody

5. Stabilizační obvody

Vlastnosti stabilizátorů charakterizuje tzv. činitel stabilizace S , který udává, kolikrát stabilizátor zmenší kolísání napětí na výstupu ve srovnání s kolísáním na vstupu. Podle provedení stabilizátoru je rozdělujeme na parametrické a zpětnovazební. [3]

$$S = \frac{\frac{\Delta U_1}{U_1}}{\frac{\Delta U_2}{U_2}} \quad (8)$$

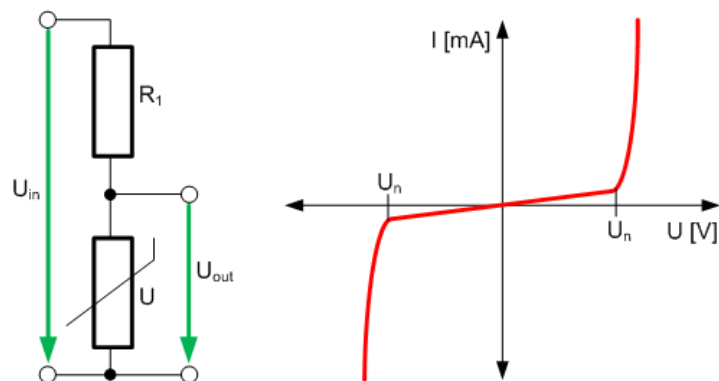


Obr. 5.1: Stabilizátor napětí

5.1. Parametrické stabilizační obvody

Parametrické stabilizátory využívají vhodného průběhu voltampérových charakteristik u součástek jako je dioda, Zenerova dioda, doutnavka a varistor. Pokud je v pracovním bodě dynamický odpor mnohem menší než statický, pak se jedná o stabilizátor napětí. Jestliže je dynamický odpor mnohem větší jak statický odpor, mluvíme o stabilizátoru proudu. Níže jsou popsána některá zapojení parametrických stabilizátorů. Neuvádím zapojení stabilizátoru se Zenerovou diodou. Tomuto zapojení se blíže věnuji v praktické části, konkrétně v kapitole 11. [3,9]

Prvním z parametrických stabilizátorů je stabilizátor s varistorem. Varistor je rezistor závislý na napětí. Se zvyšujícím napětím roste protékající proud a po dosažení napětí U_n poklesne jeho vnitřní odpor. Zapojení takového stabilizátoru spolu s voltampérovou charakteristikou varistoru je zobrazen na obr. 3.1.1. Varistory se používají jako přepět'ové ochrany. [7]

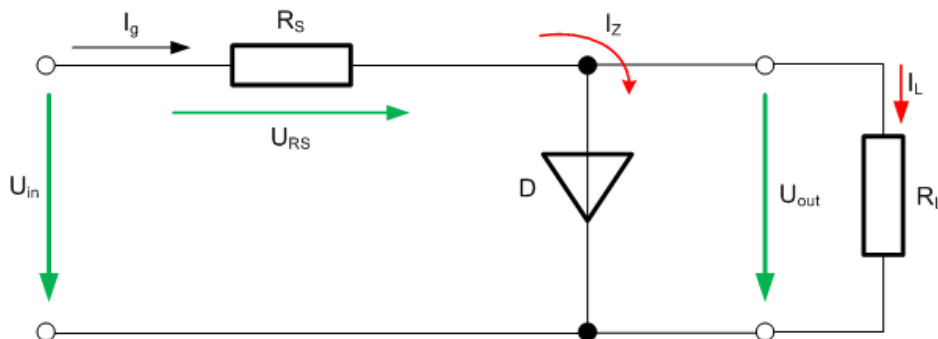


Obr. 5.1.1: Parametrický stabilizátor s varistorem, VA charakteristika varistoru

Stabilizátor s diodou slouží pro stabilizaci malého napětí. Pokud zapojíme více diod do série, dosáhneme většího stabilizovaného napětí, protože se napětí sčítají (max. 3). Dioda se zapojuje do obvodu v propustném směru (Obr. 5.1.2). Odpor R_s určuje polohu pracovního bodu. [3]

$$R_s = \frac{U_{in} - U_F}{I_z} \quad (9)$$

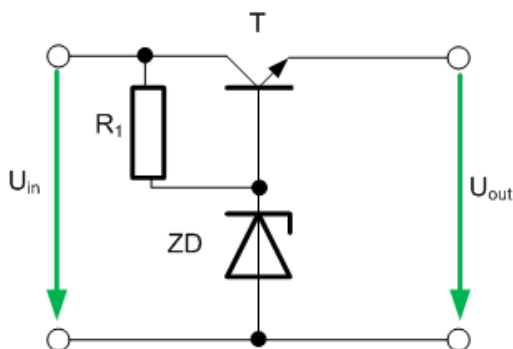
Hlavními nevýhodami tohoto zapojení je malá zatížitelnost, energetická účinnost a malý činitel stabilizace S . Typická velikost činitele stabilizace bývá okolo 10. [3]



Obr. 5.1.2: Parametrický stabilizátor s diodou

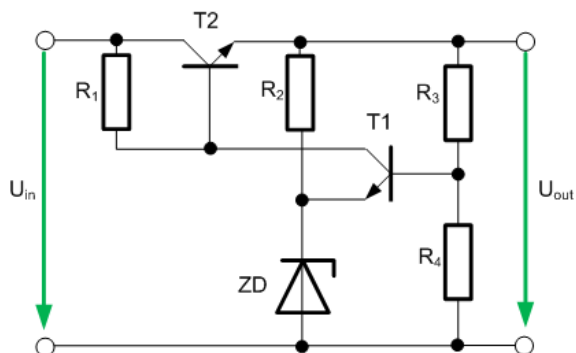
5.2. Zpětnovazební stabilizační obvody

U těchto stabilizátorů působí výstupní stabilizované napětí na regulační prvek stabilizátoru. Nejčastěji to bývá tranzistor. Nedostatkem zpětnovazebních stabilizátorů je malý výstupní výkon. Na obr. 5.2.1 je zobrazeno nejzákladnější zapojení stabilizátoru se zpětnou vazbou. Zenerova dioda slouží jako zdroj napětí pro bázi tranzistoru. Dioda je zatížena malým proudem do báze, proto napětí na Zenerově diodě je přibližně napětí U_{out} . Pokud poklesne výstupní napětí U_{out} , tak se zvětší napětí mezi bází a emitorem. Tranzistor se více otevře, a proto se zvětší výstupní napětí. Stabilizátor také slouží jako aktivní filtr. [3]



Obr. 5.2.1: Tranzistorový stabilizátor

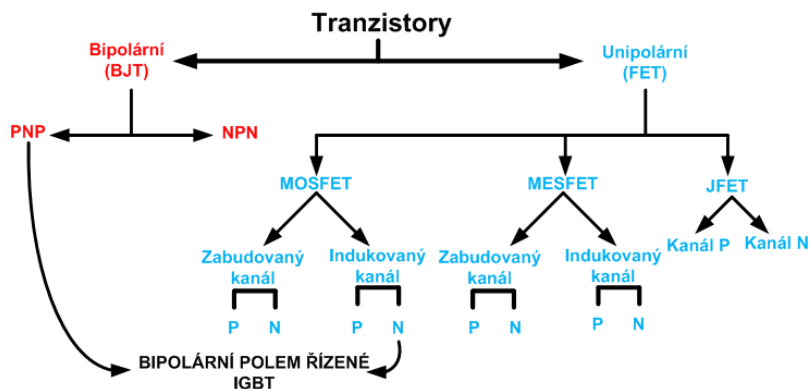
Lepší výsledky získáme složitějším zapojením stabilizátoru (Obr. 5.2.2). Snímač odchylky (T1) porovnává stálé napětí s napětím na výstupu a vytváří rozdílové napětí. Rozdílové napětí postupuje na regulační člen (T2) a mění jeho vnitřní odpor. Zdrojem stálého napětí je Zenerova dioda. [3]



Obr. 5.2.2: Regulační zpětnovazební stabilizátor

6. Tranzistory

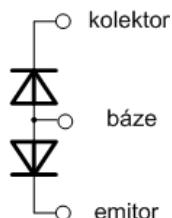
Název vyplývá ze spojení slova transfer = přenášet a rezistor = odpor. Důvodem pojmenování byla změna odporu mezi dvěma svorkami, řízená velikostí proudu v řídícím obvodu do třetí svorky. Rozdělení tranzistorů podle konstrukce je uvedeno na obr. 6. 1. [4]



Obr. 6.1: Rozdělení tranzistorů dle konstrukce

6.1. Bipolární tranzistor

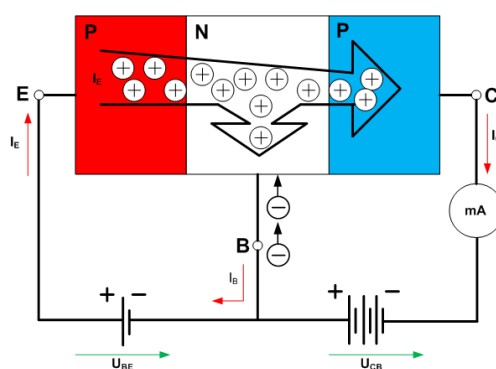
Bipolární tranzistor je aktivní polovodičová součástka, kterou tvoří dva PN přechody. Bipolární tranzistor využívá obou nositelů náboje, v případě unipolárních tranzistorů tomu tak není. Podle pořadí vrstev rozlišujeme tranzistor typu NPN a PNP. Bipolární tranzistor se skládá ze tří elektrod, které nazýváme emitor, báze a kolektor. Aby tranzistor zesiloval, musí být přechod báze - emitor polarizován v propustném směru a přechod báze - kolektor v závěrném směru. Pak je možné malým proudem do báze řídit hlavní proud, který protéká přes emitor do kolektoru. Tranzistor si také můžeme představit jako dvě polovodičové diody (Obr. 6.1.1). Jako výchozí materiál se používá stejně jako u diod křemík. [1,2,4,5]



Obr. 6.1.1: Náhradní schéma NPN tranzistoru

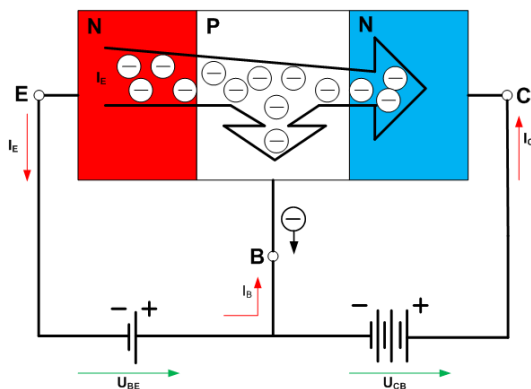
6.1.1. Princip činnosti

Přivedeme-li do odvodu napětí větší než je prahové napětí diody, dojde k otevření přechodu báze - emitor. Díry jako minoritní nositelé náboje začnou přecházet z emitoru do báze. Vznikne emitorový proud I_E . Protože je báze úzká, začne celý emitorový proud přecházet až do kolektoru tranzistoru. Mnohonásobně se zvětší výkon v obvodě kolektoru. Emitorový proud je ovládán změnou napětí báze - emitor (Obr. 6.1.1.1). Rekombinací děr vznikne úbytek elektronů v oblasti báze, který se vyrovná báзовým proudem. [2]



Obr. 6.1.1.1: Činnost tranzistoru PNP

U tranzistoru typu PNP musí být opět dioda báze - emitor polarizovaná v závěrném směru. Tím zajistíme, že z báze do kolektoru budou přecházet pouze minoritní nositelé náboje. Jestliže je proud $I_E = 0$, tak výstupním obvodem prochází malý proud I_{CB0} . Pokud zvýšíme napětí báze - emitor, pak dojde k jeho otevření. Z emitoru začnou přecházet elektrony do báze a podstatná část také začne přecházet do kolektoru. Vzniká výstupní proud I_C . [2]



Obr. 6.1.1.2: Činnost tranzistoru NPN

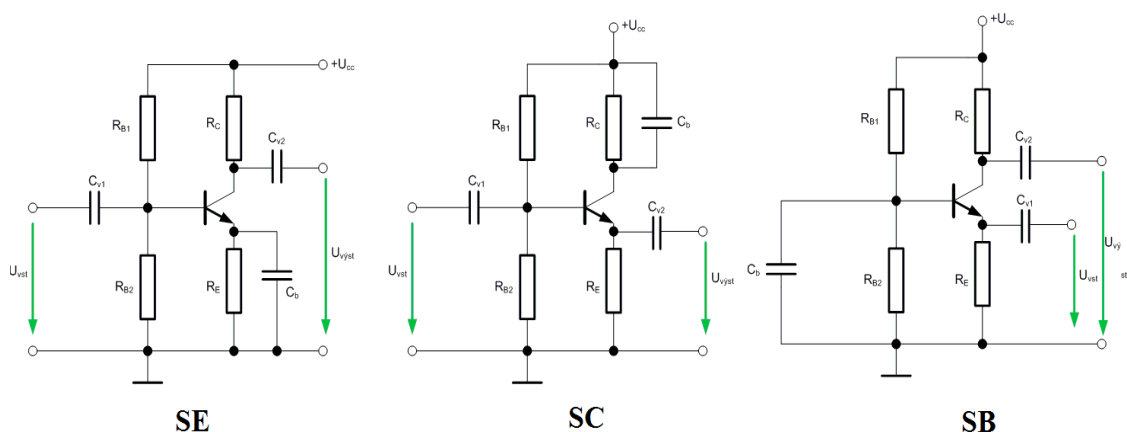
6.1.2. Základní zapojení bipolárního tranzistoru

Zapojení dvojbranu se skládá ze čtyř svorek. Dvě jsou na vstupu a dvě na výstupu. U tranzistoru jsou pouze tři svorky, proto musí být jedna společná pro vstup a výstup. Podle toho, kterou svorku připojíme na společný vodič, rozlišujeme tři základní zapojení (Obr. 6.1.2). V našem případě se jedná o zapojení střídavých zesilovačů. U všech tří zapojení je stejnosměrný pracovní bod nastaven odpory R_{B1} , R_{B2} , R_C a R_E . [4]

U zapojení se společným emitorem (SE) je kondenzátor C_b připojen ke společnému vodiči. Přemostěnými rezistory protéká pouze stejnosměrný proud. Střídavý signál je přiváděn přes vazební kapacitu C_{V1} . Ta stejnosměrně odděluje zesilovač od zdroje, protože by mohlo dojít ke změně pracovního bodu. Vstupní signál je přiváděn do báze a výstupní signál je odebrán v kolektoru. [4]

Pokud se blíže zaměříme na zapojení se společným kolektorem (SC), zjistíme, že pro střídavé signály je kolektor uzemněn. Do obvodu je řazena kapacita C_b přes kladný pól zdroje U_{cc} . Pro střídavý signál se stejnosměrný zdroj U_{cc} chová jako zkrat, protože má malý vnitřní odpor. [4]

U zapojení se společnou bází (SB) je vstupní napětí dodáváno do emitoru a výstupní napětí je odebráno z kolektoru. Báze je opět uzemněna kapacitou C_b . [4]



Obr. 6.1.2.1: Základní zapojení střídavých zesilovačů s bipolárním tranzistorem

7. Zesilovače

Zesilovač je čtyřpól, který umožňuje zesílení vstupního elektrického signálu. Pro správnou funkci potřebuje zdroj, který doplňuje vstupní energii na výstupní (Obr. 7.1). Mezi základní vlastnosti patří zesílení, nelineární zkreslení, stabilita obvodu a šířka pásma. Zesílení udává, kolikrát se zvětší vstupní parametr (napětí, proud, výkon). Nelineární zkreslení je způsobeno nelinearitou aktivních součástek. Zesilovače můžeme rozdělit podle různých kritérií. [3]



Obr. 7.1: Zesilovač jako čtyřpól

Rozdělení zesilovačů podle různých kritérií

1. Podle použitých aktivních součástek

- elektronkové zesilovače
- tranzistorové zesilovače
- zesilovače s integrovaným obvodem
- zesilovače s jinými součástkami (relé apod.)

2. Podle druhu frekvence a vstupního signálu

- nízkofrekvenční
- vysokofrekvenční
- impulzové
- stejnosměrné

3. Podle velikosti budícího signálu

- předzesilovače
- výkonové zesilovače

4. Podle vazby mezi zesilovacími stupni

- RC vazba
- transformátorová vazba
- přímá vazba

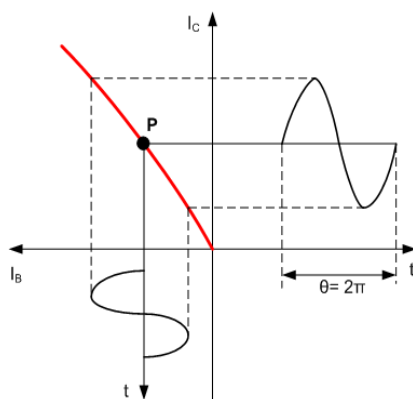
Vzhledem k zaměření mé bakalářské práce se budu zabývat pouze tranzistorovými zesilovači. V dnešní době jsou více používány operační zesilovače a integrované obvody.

7.1. Třídy zesilovačů

Zesilovače rozdělujeme do tříd, které charakterizují pracovní vlastnosti zesilovače. Podle polohy klidového pracovního bodu na převodní charakteristice dělíme zesilovače do čtyř základních tříd (A, B, AB, C).

7.1.1. Zesilovač třídy „A“

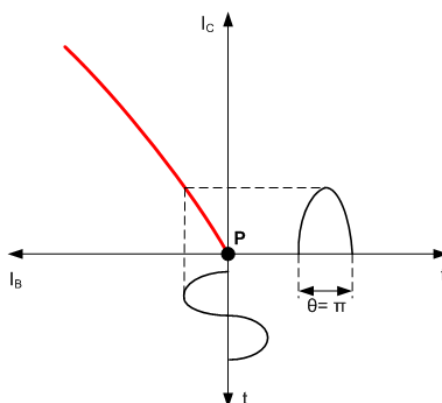
Zesilovač pracující ve třídě „A“ má klidový pracovní bod umístěn v lineární části převodní charakteristiky (Obr. 7.1.1.1). To znamená, že pracovní bod je ve vodivém stavu. Tranzistorem po celou dobu periody proudu I_B prochází kolektorový proud I_C . Ze všech tříd má tato třída nejmenší zkreslení signálu. V této třídě pracují hlavně jednostupňové zesilovače malých výkonů. Hlavní nevýhodou je malá energetická účinnost koncového stupně. [3]



Obr. 7.1.1.1: Zesilovač třídy „A“

7.1.2. Zesilovač třídy „B“

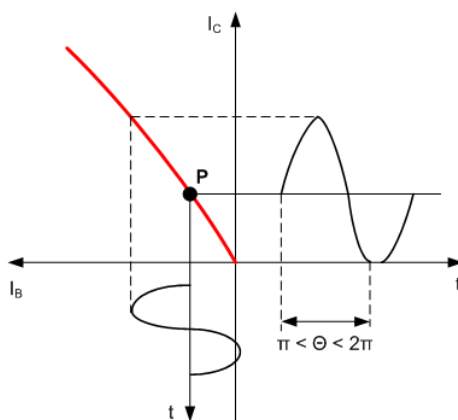
Klidový pracovní bod je umístěn v místě zániku kolektorového proudu (Obr. 7.1.2.1). V klidovém stavu neprochází tranzistorem proud, proto má zesilovač velkou účinnost. Jedna půlperioda je potlačena, toho se využívá u dvojstupňových zesilovačů. Každý tranzistor zpracovává jednu polovinu budícího signálu. Nevýhodou je velké nelineární zkreslení. [3]



Obr. 7.1.2.1: Zesilovač třídy „B“

7.1.3. Zesilovač třídy „AB“

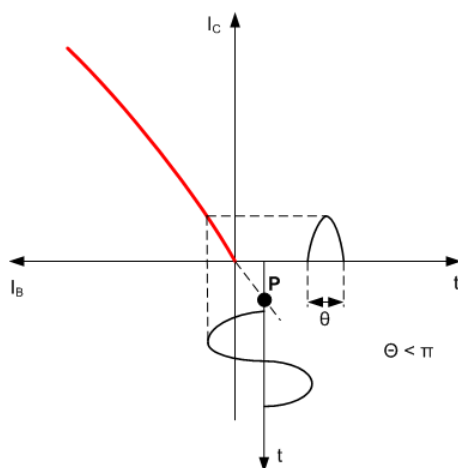
Tato třída je kompromis mezi třídou „A“ a „B“. Pracovní bod se nachází blíže ke třídě „B“. Při malých signálech pracuje zesilovač jako ve třídě „A“ a při velkých signálech jako zesilovač ve třídě „B“. Výhodou je dobrá účinnost a malé nelineární zkreslení. [3]



Obr. 7.1.3.1: Zesilovač ve třídě „AB“

7.1.4. Zesilovač třídy „C“

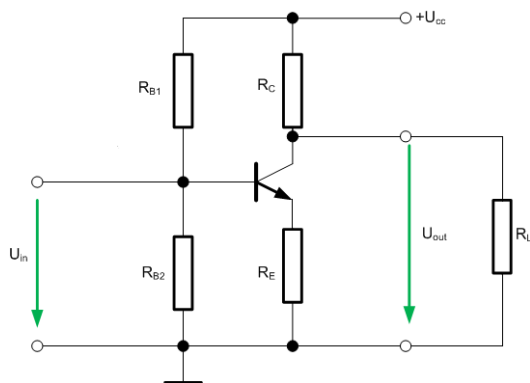
Nastavený pracovní bod se nachází v oblasti zániku kolektorového proudu I_C . Část signálu se ořízne a zbytek zesílí. Nevýhodou je velké zkreslení signálu, proto se zesilovač v této třídě používá v oddělovačích a omezovačích, kde tato nevýhoda není chybou. Naopak se nepoužívá v nízkofrekvenční technice. [3]



Obr 7.1.4.1: Zesilovač ve třídě „C“

7.2. Stejnoscenný zesilovač

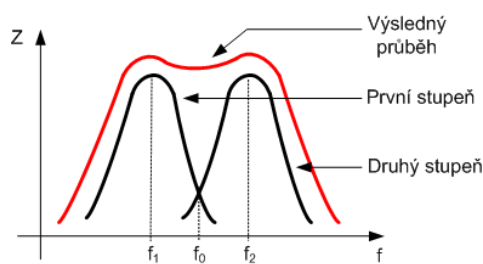
Stejnoscenné zesilovače nesmějí mít ve svém zapojení žádné frekvenčně závislé prvky, jako jsou například kondenzátory. Kdyby tomu tak bylo, nebylo by možné přenášet pomalé změny stejnosměrných napětí. [1]



Obr. 7.2.1: Příklad stejnosměrného zesilovače

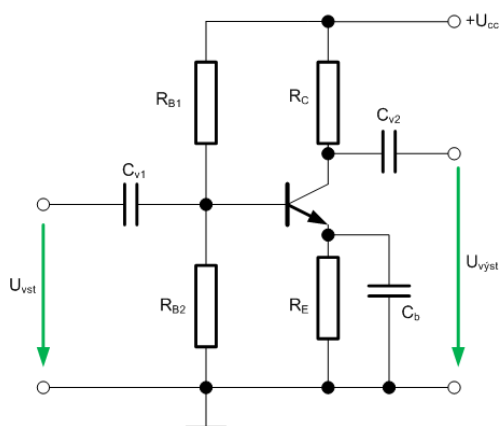
7.3. Střídavý zesilovač

Střídavé zesilovače dělíme na širokopásmové a selektivní. Širokopásmové přenášejí signál v širokém rozsahu kmitočtů, proto se využívají v měřicí technice (osciloskopy). Širokopásmové zesilovače rozdělujeme do dvou skupin. První skupinou jsou širokopásmové zesilovače s nosnou frekvencí označované jako souběžně laděné. Do této skupiny patří vícestupňové zesilovače s laděnými obvody mezi stupni. Laděné obvody jsou nastaveny na stejnou frekvenci a počet stupňů určuje zesílení daného zesilovače. S počtem stupňů ale klesá šířka pásma. Šířku pásma lze zvětšit tak, že obvody naladíme na rozdílné frekvence (Obr. 7.3.1). Obvody naladěné na rozdílné frekvence se označují jako rozložené laděné. [1,3]



Obr. 7.3.1: Převodní charakteristiky rozloženě laděných obvodů

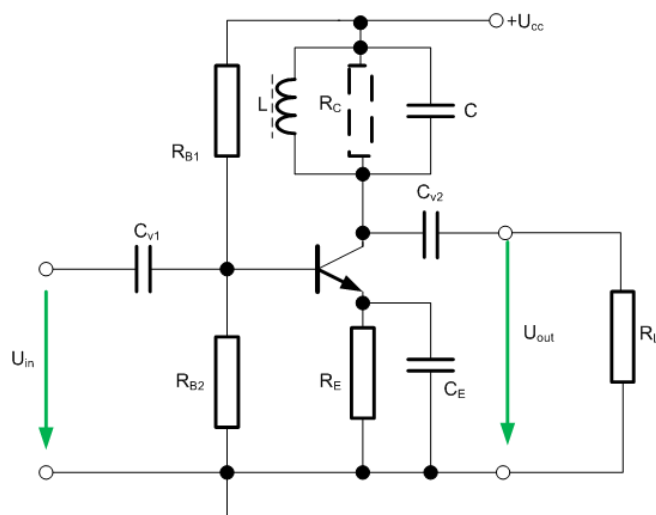
Druhou skupinou jsou širokopásmové zesilovače bez nosné frekvence. Zesilují signály od několika Hz až po několik MHz. Jelikož se často používají v televizní technice, jsou také nazývány videozesilovače. [3]



Obr. 7.3.2: Příklad širokopásmového zesilovače

Selektivní zesilovače se využívají k zesílení vysokofrekvenčních signálů s relativně malou šířkou kmitočtového pásma. Místo kolektorového rezistoru R_c mají zapojen paralelní rezonanční obvod, který má při rezonanci největší impedanci a zesilovací stupeň má na rezonančním kmitočtu největší zesílení. Šířka pásma závisí na jakosti rezonančního obvodu. Rezananční kmitočet selektivního zesilovače se určí z Thomsonova vztahu. [1]

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad (10)$$



Obr. 7.3.3.: Příklad selektivního zesilovače

8. Tektronix 370A

Tento mikroprocesorem řízený měřicí přístroj byl uveden na trh v roce 1992 společností Tektronix, jejíž působnost se datuje již od roku 1946. Firma nabízí širokou škálu analyzátorů, osciloskopů, DC zdrojů a mnoho dalších zařízení používaných v elektronice a elektrotechnice. Analyzátor 370A je určen pro přesné měření statických a dynamických charakteristik polovodičových součástek jako jsou např. diody, tranzistory, tyristory, optoelektronické součástky, solární články a další.



Obr. 8.1: Tektronix 370A

8.1. Parametry

Napájení

Napětí v rozmezí 0 – 2000 V

Proud v rozmezí 0,05 – 10 A

AD převodník

Horizontální rozlišení 5 mV – 500 V/dílek

Vertikální rozlišení 100 pA – 2 A/dílek

10 bitů

Krokový generátor

Proudový rozsah 50nA – 200 mA

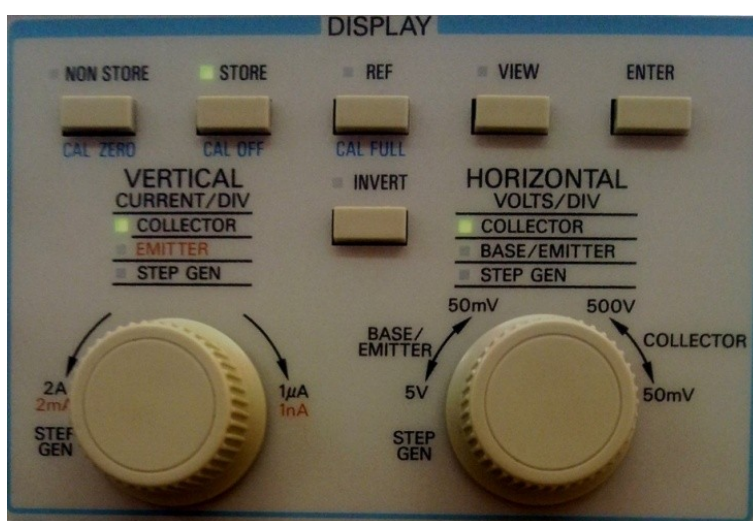
Napěťový rozsah 50 mV – 2 V

Délka pulzu 80μs nebo 300μs

8.2. Popis tlačítek

Převážná část tlačítek je umístěna na hlavním panelu přístroje. Tlačítka, která spolu souvisí, jsou řazena do společného bloku. Bloky popisují v následujících podkapitolách. Mimo hlavní panel jsou řazena některá další tlačítka a ovládací prvky. Jejich vysvětlení najdeme v poslední podkapitole.

8.2.1. Display



Obr. 8.2.1.1: Blok Display

NON STORE - analogové zobrazení charakteristiky.

STORE - digitální zobrazení charakteristiky.

REF - uchová zobrazenou charakteristiku do referenční paměti. Další odměřená charakteristika může být zobrazena zároveň s touto referenční.

VIEW - zobrazí charakteristiku uloženou v paměti pod námi zvoleným indexem. Při stlačení VIEW a FAST/SHIFT se mění funkce tohoto tlačítka na COPY. To nám umožňuje uložit šestnáct charakteristik z diskety do pevné paměti přístroje. Musí být nastaven index, od kterého se začíná ukládat.

ENTER - uloží křivku do paměti. Nelze použít v analogovém zobrazení. S kombinací s tlačítkem FAST/SHIFT se mění funkce tlačítka na COPY. Uloží nám šestnáct charakteristik z paměti přístroje na disketu. Opět musí být nastaven paměťový index, od kterého se bude ukládat.

INVERT - obrátí nám (horizontálně, vertikálně) zobrazenou charakteristiku. Funkční v analogovém i digitálním módu.

VERTICAL CURRENT/DIV - slouží pro vybrání vertikálních faktorů (COLECTOR, BASE/EMITTER, STEP GEN).

HORIZONTAL CURRENT/DIV - slouží pro vybrání horizontálních faktorů (COLECTOR, EMITTER, STEP GEN).

8.2.2. Step generator



Obr. 8.2.2.1: Blok Step generator

NUMBER OF STEPS - počet kroků step generátoru (počet vykreslených křivek).

VOLTAGE - napěťový krok generátoru.

CURRENT - proudový krok generátoru.

OFFSET - nastaví hodnotu, od které budou prováděny kroky generátoru.

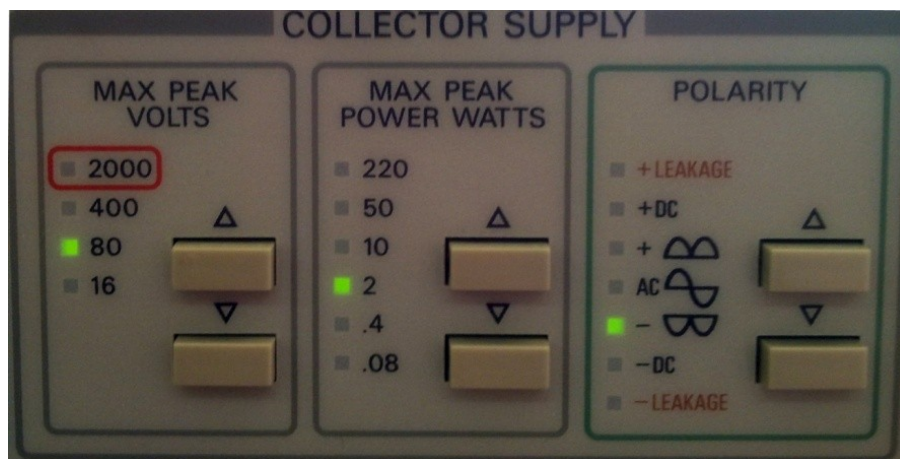
STEP AMPLITUDE - nastavení velikosti kroku generátoru. Na výběr je napěťový krok generátoru od 50mV do 2V nebo proudový krok od 50nA až 200mA.

POLARITY - přepínání polarity pulsů step generátoru.

STEP MULTI .1X - krom amplitudy signálu snižuje faktorem deseti bez vlivu na OFFSET amplitudy.

PULSE - vypnutí nebo nastavení pulsu step generátoru. Off značí vypnuto. LONG je dlouhý puls, který trvá 300μs. SHORT je krátký puls trvající 80μs.

8.2.3. Collector supply



Obr. 8.2.3.1: Blok Collector supply

Blok collector supply je rozdělen na další tři podbloky. Tlačítka nahoru a dolů se listuje v příslušném podbloku.

MAX PEAK VOLTS - nastavení maximálního napětí od 16 V až 2000 V.

MAX PEAK POWER WATTS - nastavení ztrátového výkonu od 0.08 W do 220 W.

POLARITY - nastavení polarity a tvaru napájecího napětí dodávaného do měřené součástky.

8.2.4. Memory, Setup



Obr. 8.2.4.1: Blok Memory, Setup

MEMORY - navolení paměťového indexu pro ukládání.

SAVE, FORMAT - uloží nám charakteristiku a nastavení na příslušný paměťový index. Funkce tohoto tlačítka se změní se stiskem tlačítka FAST/SHIFT. Tlačítko má poté funkci FORMAT. Funkce FORMAT slouží pro formátování diskety.

RECALL, DIRECTORY - vyvolání nastavení, které jsme si uložili do paměti přístroje.

8.2.5. Gpib, Acq mode, Measurement



Obr. 8.2.5.1: Gpib, Acq Mode, Measurement

LOCAL - změna provozního režimu Tektronix 370A z dálkového na místní.

ACQ - určuje způsob získávání dat pro ukládání.

REPEAT - opakované generování signálu krokovým generátorem. Měření se provádí opakovaně.

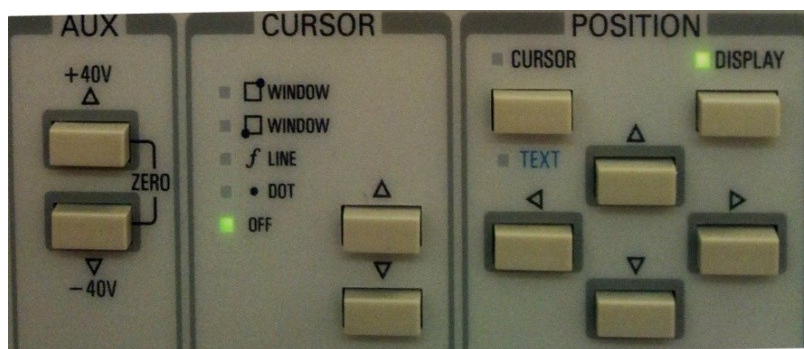
SINGLE - krokový generátor vytváří pouze jeden krok signálu.

SWEEP - vykreslení křivky.

MAG X 10 - vertikálně a horizontálně zvětší NON STORE a STORE zobrazené křivky o faktor 10. Tato funkce nemá vliv při zobrazení VIEW a při referenčním zobrazení.

FAST/SHIFT - používá se pro změnu významu tlačítek. Některá tlačítka mají dvě funkce. Druhá funkce bývá napsána modrým písmem u tlačítka.

8.2.6. Aux, Cursor, Position



Obr. 8.2.6.1: Aux, Cursor, Position

AUX - pomocné napájecí napětí.

CURSOR - výběr kurzoru (tečka, čára, okno).

POSITION - nastavení pozice kurzoru pomocí šipek. Po stisknutí tlačítka DISPLAY lze šipkami posouvat naměřenou charakteristiku.

8.2.7. Ostatní tlačítka a ovládací prvky

VARIABLE COLLECTOR SUPPLY - slouží k nastavení napětí v procentech. Tedy můžeme nastavit 0-100% z maximálního napětí.

OUTPUTS - má dvě polohy ENABLED a DISABLED. Tento přepínač nám slouží k odpojení nebo připojení napájecího napětí na konektory.

CONFIGURATINON - výběr nastavení z tabulky (Tab. 8.2.7.1). Listování pomocí tlačítek nahoru a dolů.

COLLECTOR	BASE	EMITTER
COLLECTOR SUPPLY	STEP GEN	COMMON
COLLECTOR SUPPLY	OPEN (EXT)	COMMON
COLLECTOR SUPPLY	SHORT (EMITTER)	COMMON
COLLECTOR SUPPLY	COMMON	OPEN (EXT)
COLLECTOR SUPPLY	COMMON	STEP GEN
OPEN	COLLECTOR SUPPLY	COMMON

Tab. 8.2.7.1: Výběr konfigurace

ADAPTER CONECTOR - se skládá ze dvou částí, a to z levé a pravé (Obr. 6.2.7.1). Jednotlivé části slouží pro připojení různých adaptérů. Tlačítka LEFT a RIGHT se volí, s jakou částí chceme pracovat.



Obr. 8.2.7.1: Adapter conector

8.3. Příprava k měření

Stlačením tlačítka POWER se Tektronix 370A uvede do chodu a poté se okamžitě inicializuje. Po provedení inicializace je přístroj připraven k použití. V tu chvíli se „nachází“ ve výchozím stavu (Tab. 8.3.1). Nejprve připojíme vývody součástky k adaptéru. Na každém adaptéru jsou písmeny vyznačeny elektrody. Například při měření diody musíme dbát na správné připojení anody a katody. Na adaptéru je anoda vyznačena velkým písmenem A, katoda velkým písmenem K. Označení vývodů součástky najdeme v dokumentaci. Většinou bývá katoda označena proužkem.

K měření jsem použil dva adaptéry (Obr. 8.3.1). Vlevo je adaptér pro měření polovodičových diod (A1005) a vpravo adaptér pro měření tranzistorů (A1002). Adaptér se zasune do části ADAPTER CONNECTOR a přiklopí se ochranný kryt. Bez přiklopeného ochranného krytu nelze měření provést. Při manipulaci s konektory doporučuji přepnout outputs do polohy DISABLED.



Obr. 8.3.1: Použité adaptéry

CONTROL	DEFAULT
MEASUREMENT	REPEAT
MEMORY INDEX	1
CONFUGURATION	BASE= STEP GEN EMITTER= COMMON
LEFT-RIGHT-STANDBY	STANDBY
MAX PEAK VOLTS	16
POWER WATTS	0,08
POLARITY	+
PULSE	OFF
NUMBER OF STEPS	5

Tab. 8.3.1: Výchozí nastavení Tektronix 370A

8.4. Měření charakteristik bipolárního tranzistoru

Parametr	Hodnota	Jednotka
I_C	0,5	A
U_{CE0}	80	V
U_{CB0}	80	V
P_d	0,6	W
h_{21E}	60-400	-
f_T	200	MHz
Pouzdro	TOP 92	-

Tab. 8.4.1: Technické parametry bipolárního tranzistoru BC489

8.4.1. Výstupní charakteristika

- a) umístění adaptéru A1002 vpravo a zavření ochranného krytu
- b) nastavení ovladače LEFT-RIGHT STANDBY do polohy RIGHT
- c) nastavení paměťového indexu na 1 a stlačení tlačítka RECALL
- d) blok Display: VERTICAL CURRENT/DIV = $1/10 I_C$

HORIZONTAL VOLT/DIV = 1V

DISPLAY MODE = STORE

- e) přepnutí výstupu na ENABLED
- f) VARIABLE COLLECTOR SUPPLY = 10V
- g) MAX PEAK VOLTS = 16V
- h) MAX PEK POWER WATS = 0,4W
- i) POLARITY = kladná polarita
- j) MEASUREMENT = REPEAT
- k) ACQ MODE = NORM
- l) počet vykreslených křivek NUMBER OF STEPS = 11
- m) výběr pulsu generátoru - PULSE LONG
- n) nastavení kroku generátoru STEP AMPLITUDE
- o) vykreslení charakteristiky tlačítkem SWEEP a uložení

8.4.2. Vstupní charakteristika

- a) přepnutí VERTICAL osy na Step gen (Blok Display)
- b) přepnutí HORIZONTAL osy na BASE/ EMITTER - 50mV/div
- c) NUMBER OF STEPS = 8
- d) VARIABLE COLLECTOR SUPPLY = 8 V
- e) STEP GEN = 500nA/step
- f) zobrazení vstupní charakteristiky

Pro určení všech potřebných parametrů tranzistoru potřebujeme znát ještě převodní a zpětnou charakteristiku. Tyto charakteristiky se odvodí z výstupní a vstupní charakteristiky. Odvození najdeme v kapitole 9.3.

8.5. Měření charakteristiky Zenerovy diody

Parametr	Hodnota	Jednotka
U_z	56	V
I_{zmax}	89	mA
P_{tot}	5	W
Pouzdro	DO-201	-

Tab. 8.5.1: Technické parametry Zenerovy diody 1N5370B

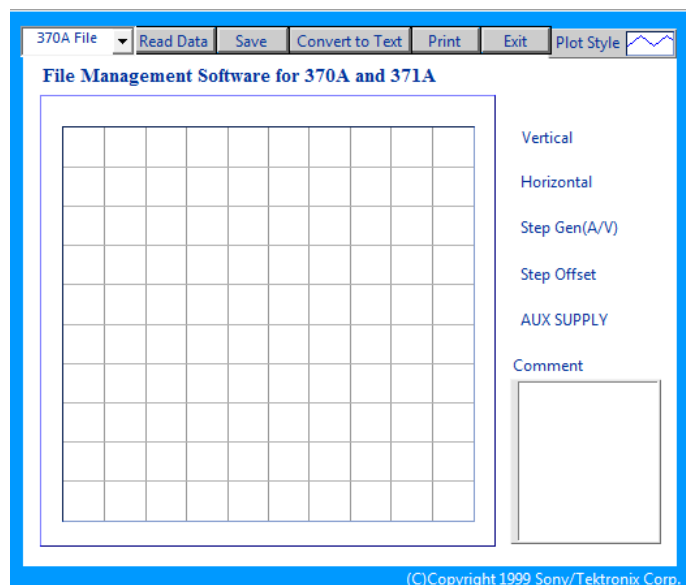
- a) adaptér A1005 umístěn v pravo
- b) memory index = 1, RECALL
- c) LEFT-RIGHT-STANDBY = RIGHT
- d) CONFIGURATION – BASE = SHORT (EMITTER), EMITTER = COMMON
- e) nastavení horizontálního a vertikálního rozlišení
- f) OUTPUTS = ENABLED
- g) pomocí VARIABLE COLLECTOR SUPPLY rozvineme charakteristiku
- h) pro zobrazení obou směrů POLARITY = AC

8.6. Uložení na pružný disk

Disketová mechanika podporuje pouze diskety o kapacitě 720 kB (2DD). Tyto diskety už nelze zakoupit. Proto bylo nutné zalepit výřez diskety o kapacitě 1,44MB (2HD) a naformátovat v přístroji na požadovaných 720 kB.

- a) vložení pružného disku do disketové mechaniky
- b) pro formátování stlačíme tlačítko FAST/SHIFT a zároveň SAVE
- c) vyvolání uložené charakteristiky v paměti pomocí RECALL
- d) memory index = 17
- e) ENTER - uloží charakteristiku do paměti na index 17
- f) SAVE na pružný disk

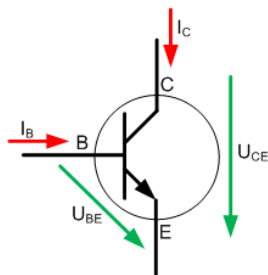
Do paměti přístroje můžeme uložit až 16 křivek, index 1-16. Od indexu 17 je paměť pro pružný disk. Abychom tedy mohli charakteristiku uložit na pružný disk, musíme ji uložit na pozici od indexu 17 a teprve pak na disketu. Na jeden pružný disk lze uložit až 64 charakteristik a nastavení. Další zpracování se provádí v počítači pomocí softwaru Curve Tracer Utility Version 1.01 (Obr. 6.6.1).



Obr. 8.6.1: Tektronix 370A software

9. Určení parametrů bipolárního tranzistoru

Ve své práci se zaměřuji pouze na statické parametry tranzistoru. Ze statických charakteristik se dají zjistit typické parametry tranzistoru. Statické charakteristiky vyjadřují souvztažnosti mezi veličinami tranzistoru. Veličiny jsou vyznačeny ve schematické značce bipolárního tranzistoru NPN (Obr. 9.1).



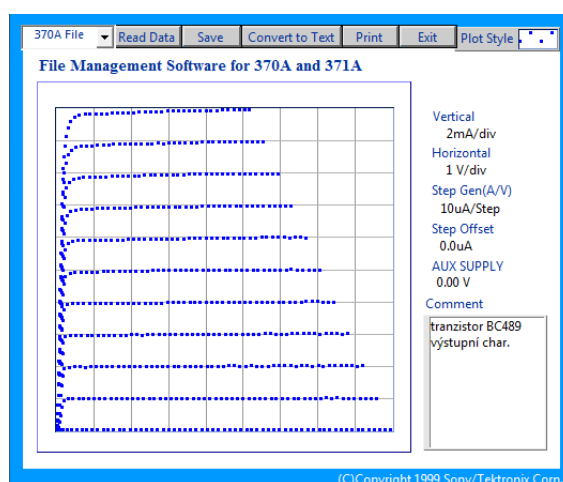
Obr. 9.1: Potřebné veličiny pro určení parametrů tranzistoru

9.1. Výstupní vodivost

Nejdůležitější charakteristikou je výstupní charakteristika $I_C = f(U_{CE})$ při $I_B = \text{konst.}$ Slouží k určení tzv. „h“ parametru. Jedná se o hybridní parametr dvojbranu označovaný jako h_{22} , který udává výstupní vodivost (výstupní admitanci). Tranzistor bude v zapojení se společným emitorem, proto se výstupní vodivost označuje jako h_{22e} .

$$h_{22e} = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{CE}} \quad (11)$$

Horizontální ose (U_{CE}) jsem přiřadil 1 V/dílek a vertikální ose (I_C) jsem přiřadil 2 mA/dílek. Krokovým generátorem je nastaven proud do báze I_B s krokem 10 μA . Výsledek měření je zobrazen na obr. 9.1.1. Software pro Tektronix 370A také umožňuje funkci Convert to text. To znamená, že se automaticky vygenerují tabulky. Tabulky byly dle mého názoru rozsáhlé a nepřehledné, proto jsem zvolil odečtení jednotlivých bodů charakteristiky pomocí kurzoru. Kurzor jsem nastavil tak, aby se pohyboval pouze po odměřených bodech. Jako příklad uvádím tři tabulky pro proudy do báze 40,50,60 μA (Tab. 3.1.1).



Obr. 9.1.1: Výstupní charakteristika tranzistoru zobrazená softwarem Tektronix 370A

$I_b = 40 \mu A$		$I_b = 50 \mu A$		$I_b = 60 \mu A$	
I_c [mA]	U_{ce} [V]	I_c [mA]	U_{ce} [V]	I_c [mA]	U_{ce} [V]
8	6	10	6	12	6
8	5	10	5	11,99	5
7,99	4	9,99	4	11,97	4
7,98	3	9,97	3	11,96	3
7,96	2	9,95	2	11,94	2
7,95	1	9,93	1	11,91	1

Tab. 9.1.1: Naměřené hodnoty výstupní charakteristiky pro $I_B = 40, 50, 60 \mu A$

Tranzistory se používají nejčastěji jako zesilovače. Zesilovač může zesilovat napětí, proud nebo výkon. Při činnosti tranzistoru nesmí dojít k jeho přetížení. Nesmíme překročit tzv. mezní hodnoty. Tyto hodnoty se udávají v katalogu pro určitou teplotu okolí (U_{CEmax} , U_{CBmax} , I_{Cmax} , I_{Bmax}). Další důležitou hodnotou v katalogu je mezní kolektorový ztrátový výkon P_D . Ztrátový výkon závisí na teplotě okolí a chlazení.

$$P_D = \frac{\vartheta_{jmax} - \vartheta_a}{R_{th}} \quad (12)$$

Z výše uvedeného kontextu vyplývá pracovní oblast tranzistoru. Tato oblast je také dána mezní přímkou *mp* a čarou mezní saturace *ms* (Obr. 9.1.2). Oblast mezi nimi se nazývá oblast saturace, která udává nejmenší dosažitelný úbytek napětí na tranzistoru při jeho úplném otevření. Zvláštní případ je saturační napětí U_{CEsat} . Je to zbytkové napětí kolektoru, definované pro daný proud kolektoru a napětí $U_{CB} = 0$. [2]

V pracovní oblasti volím vhodný klidový pracovní bod P_1 , který má souřadnice $I_{CP} = 10\text{mA}$ a $U_{CEP} = 5\text{ V}$ při $I_B = 50\text{ }\mu\text{A}$. Zesilovač musí být napájen stejnosměrným napětím U_{CC} . Vhodná hodnota napájecího napětí je 10V. Vynesl jsem statickou zatěžovací přímku R_C , která prochází pracovním bodem a protíná proudovou osu v hodnotě 20mA.

$$R_C = \frac{U_{CC} - U_{CEP}}{I_{CEP}} = \frac{10 - 5}{10 \cdot 10^{-3}} = 500\Omega \quad (13)$$

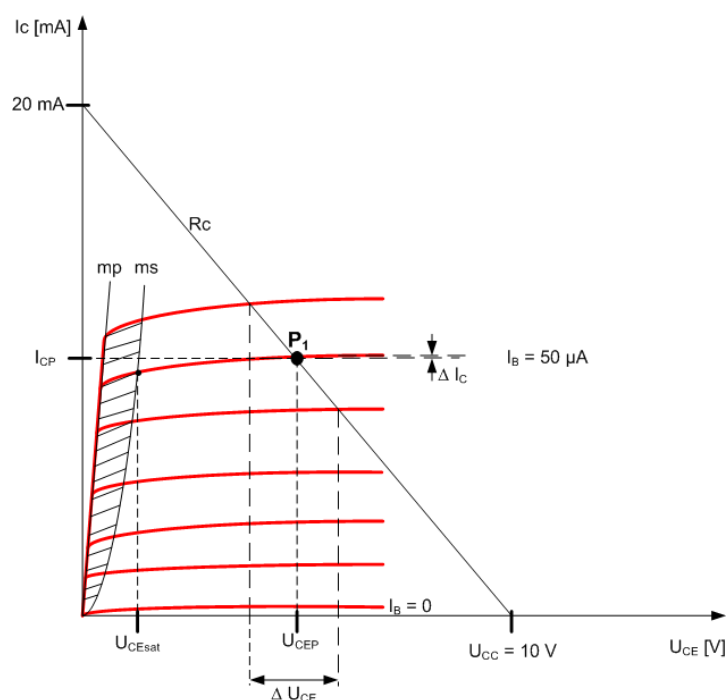
$$I_{C(RC)} = \frac{U_{CC}}{R_C} = \frac{10}{500} = 20\text{mA} \quad (14)$$

Pokud chceme zamezit nelineárnímu zkreslení signálu, měl by klidový pracovní bod ležet uprostřed statické zatěžovací přímky. Abychom určili výstupní vodivost v pracovním bodě P_1 , musíme odečíst změnu proud I_C a napětí U_{CE} .

$$h_{22e} = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{CE}} = \frac{10 \cdot 10^{-3} - 9,99 \cdot 10^{-3}}{6 - 4} = 5\mu\text{S} \quad (15)$$

Z výstupní charakteristiky vyplývá výstupní odpor tranzistoru.

$$r_{CE} = \frac{\Delta U_{CE}}{\Delta I_C} = \frac{6 - 4}{10 \cdot 10^{-3} - 9,99 \cdot 10^{-3}} = 200\text{k}\Omega \quad (16)$$



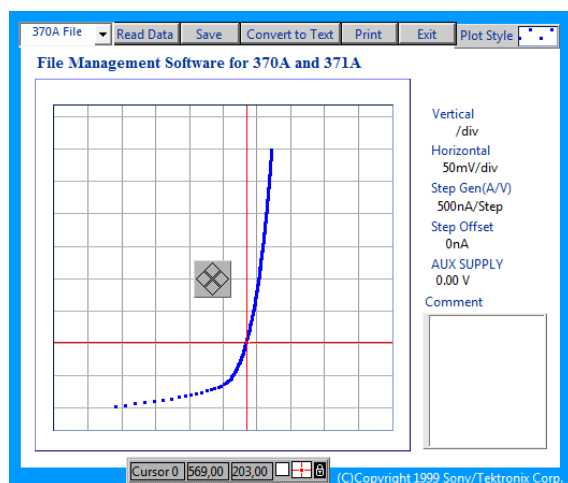
Obr. 9.1.2: Určení ΔI_C a ΔU_{CE}

9.2. Vstupní odpor

Druhou nejdůležitější charakteristikou je vstupní charakteristika. Je to závislost $I_B = f(U_{BE})$ při $U_{CE} = \text{konst.}$ Tato křivka je svým průběhem podobná křivce běžné diody. Ze vstupní charakteristiky můžeme určit vstupní odpor tranzistoru r_{BE} . V literatuře se spíše setkáme s označením h_{11e} .

$$h_{11e} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} \quad (17)$$

Horizontální osa (U_{BE}) má rozlišení 50mV/dílek. Vertikální osa nemá žádné rozlišení, ale nastavuje se krokovým generátorem přírůstek proudu I_B v každém kroku o 500nA. Menší krok generátoru jsem zvolil proto, aby byla vstupní charakteristika co nejpřesnější. Opět jsem kurzorem odečetl jednotlivé body a zapsal do tabulky (Tab. 9.2.1). Tabulka obsahuje výpis napětí báze - emitor s krokem proudu do báze $I_B = 10\text{ }\mu\text{A}$.



Obr. 9.2.1: Vstupní charakteristika zobrazená softwarem Tektronix 370A

I_B [μA]	U_{BE} [V]
10	0,263
20	0,278
30	0,290
40	0,295
50	0,307
60	0,318
70	0,326
80	0,335
90	0,340

Tab. 9.2.1: Naměřené hodnoty vstupní charakteristiky

$$h_{11e} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} = \frac{0,318 \cdot 0,295}{20 \cdot 10^{-6}} = 1150 \Omega \quad (18)$$

Šířka báze závisí na napětí přechodu báze - kolektor. S rostoucím závěrným napětím se ochuzená oblast rozšiřuje. Vzroste koncentrace minoritních nosičů v bázi a zvýší se difuzní proud. Tento jev se označuje jako Earlyho jev. Earlyho napětí se pak spočítá

$$U_{EA} = \frac{I_{CP}}{h_{22e}} = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-6}} = 2000 V \quad (19)$$

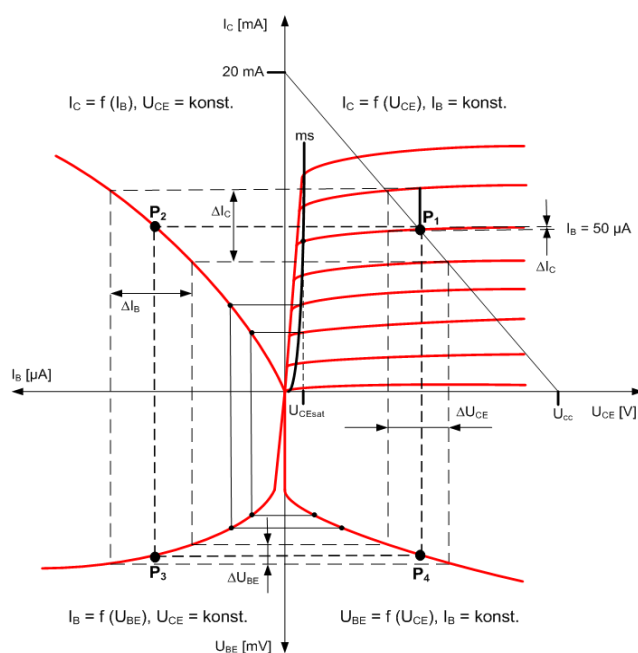
9.3. Proudový zesilovací činitel a zpětný napěťový přenos

Proudový zesilovací činitel se určí z převodní charakteristiky tranzistoru. Také ji můžeme označit jako charakteristiku proudového zesílení. Je to závislost $I_C = f(I_B)$ při $U_{CE} = \text{konst.}$ Převodní charakteristiku jsem pomocí přístroje Tektronix 370A neměřil, ale zvolil jsem grafické odvození z výstupní a vstupní charakteristiky (Obr. 9.3.1). Odvození bylo provedeno na milimetrový papír. Po odečtení změn proudu I_B a I_C , byl určen statický proudový zesilovací činitel h_{21E} .

$$h_{21E} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{11,99 \cdot 10^{-3} - 8 \cdot 10^{-3}}{20 \cdot 10^{-6}} = 199,5 \quad (20)$$

Dále jsem zkonstruoval zpětnou charakteristiku ve čtvrtém kvadrantu. Je to závislost $U_{BE} = f(U_{CE})$ při $I_B = \text{konst.}$ Byl určen zpětný napěťový zesilovací činitel h_{12e} .

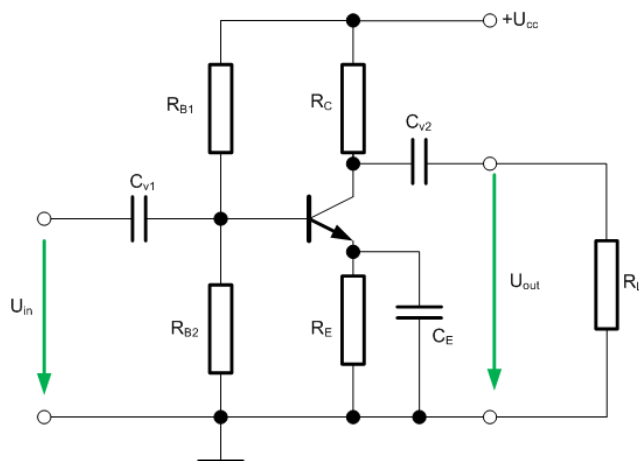
$$h_{12e} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta U_{CE}} = \frac{0,318 - 0,295}{6 - 4} = 11,5 \cdot 10^{-3} \quad (21)$$



Obr. 9.3.1: Odvození převodní a zpětné charakteristiky

10. Návrh zesilovače

Navrhl jsem zesilovač pro střídavé signály v zapojení se společným emitorem, poněvadž toto zapojení umožňuje velké napěťové a proudové zesílení (Obr. 10.1). Stabilizaci klidového pracovního bodu zajišťuje odpor R_E . Ten je pro střídavé signály zablokován emitorovým kondenzátorem C_E . Napětí pro bázi se získává odporovým děličem tvořeným odpory R_{B1} a R_{B2} . Vazební kapacity C_{v1} a C_{v2} oddělují obvod od vstupu a výstupu. Vzhledem k poloze pracovního bodu je zřejmé, že zesilovač pracuje ve třídě „A“.



Obr. 10.1: Střídavý zesilovač v zapojení se společným emitorem

$$U_{cc} = 10 \text{ V}$$

$$R_L \rightarrow \infty$$

$$U_{Rc} = \frac{1}{2} U_{cc} = 5 \text{ V}$$

Výpočet odporu R_C

$$R_c = \frac{U_{RC}}{I_{CP}} = \frac{5}{10 \cdot 10^{-3}} = 500 \Omega \quad (22)$$

Výpočet zesílení

$$A_u = \frac{h_{21E}}{h_{11e}} \cdot R_c = \frac{199,5}{1150} \cdot 500 = 86,7 \quad (23)$$

Výpočet odporu R_E

$$R_E \cong \frac{R_C}{A_u} = \frac{500}{86,7} = 5,76 \Omega \quad (24)$$

Výpočet odporového děliče

$$I_Q = 5 \cdot I_B = 5 \cdot 50 \cdot 10^{-6} = 250 \mu A \quad (25)$$

$$R_{B2} = \frac{U_{BEP} + R_E \cdot I_{CP}}{I_Q} = \frac{0,307 + 5,76 \cdot 10 \cdot 10^{-3}}{250 \cdot 10^{-6}} = 1458,4 \Omega \quad (26)$$

$$R_{B1} = \frac{U_{CC}}{I_Q} - R_{B2} = \frac{10}{250 \cdot 10^{-6}} - 1458,4 = 38541,6 \Omega \quad (27)$$

$$R_B = \frac{R_{B1} \cdot R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} = \frac{38541,6 \cdot 1458,4}{38541,6 + 1458,4} = 1405,2 \Omega \quad (28)$$

Vstupní a výstupní odpor

$$R_{výst} \cong R_C = 500 \Omega$$

$$R_{vst} = \frac{R_B \cdot (h_{11e} + R_E \cdot h_{21E})}{R_B + (h_{11e} + R_E \cdot h_{21E})} = \frac{1405,2 \cdot (1150 + 5,76 \cdot 199,5)}{1405,2 + (1150 + 5,76 \cdot 199,5)} = 1194,6 \Omega \quad (29)$$

Výpočet kondenzátorů

$$C_{v1} = C_{v2}$$

$$f_d = 200 \text{ Hz}$$

$$C_{v1} = C_{v2} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_d \cdot R_{vst}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 200 \cdot 1194,6} = 666 \text{ nF} \quad (30)$$

$$C_E = \frac{h_{21E}}{2 \cdot \pi \cdot f_d \cdot h_{11e}} = \frac{199,5}{2 \cdot \pi \cdot 200 \cdot 1150} = 1,38 \mu F \quad (31)$$

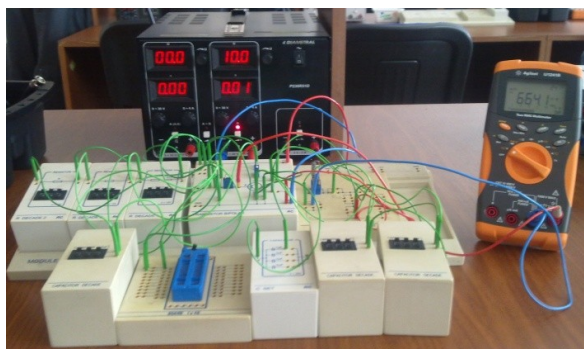
10.1. Experimentální ověření

Navržený zesilovač byl odzkoušen v laboratoři pomocí RC stavebnice (Obr. 10.1.1). Nejprve jsem obvod zapojil a přivedl stejnosměrné napájecí napětí $U_{CC} = 10\text{ V}$. Pomocí voltmetru byla odečtena stejnosměrná napětí. Porovnání teoretických a praktických výsledků uvádím v závěru bakalářské práce.

$$U_{Rc} = 4,93\text{V}$$

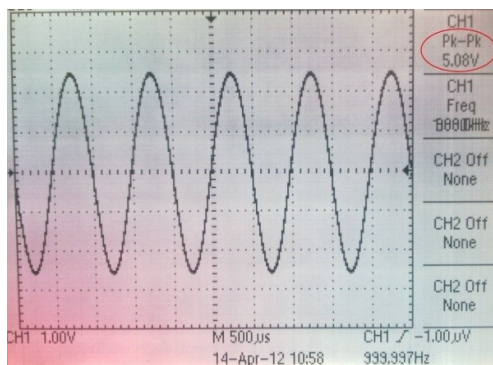
$$U_{CE} = 4,862\text{V}$$

$$U_{BE} = 664,1\text{mV}$$



Obr. 10.1.1: Experimentální ověření zesilovače

Poté byl na vstup zesilovače přiveden střídavý signál o frekvenci 1 kHz s amplitudou 50 mV. Na výstup zesilovače byl připojen osciloskop, který zobrazil výstupní střídavý signál a zesílení. Zesilovač zesílil vstupní signál 100mV na 5,08V. Výsledné zesílení je tedy 50. (Obr. 10.1.2).



Obr. 10.1.2: Výstupní průběh a zesílení

10.2. Ověření v programu Multisim

Simulační program Multisim umožňuje simulovat obvody od slaboproudu až po silnoproud, a to dokonce i ve 3D. Program je placený, ale firma poskytuje 30 - ti denní zkušební verzi, která je plně funkční.

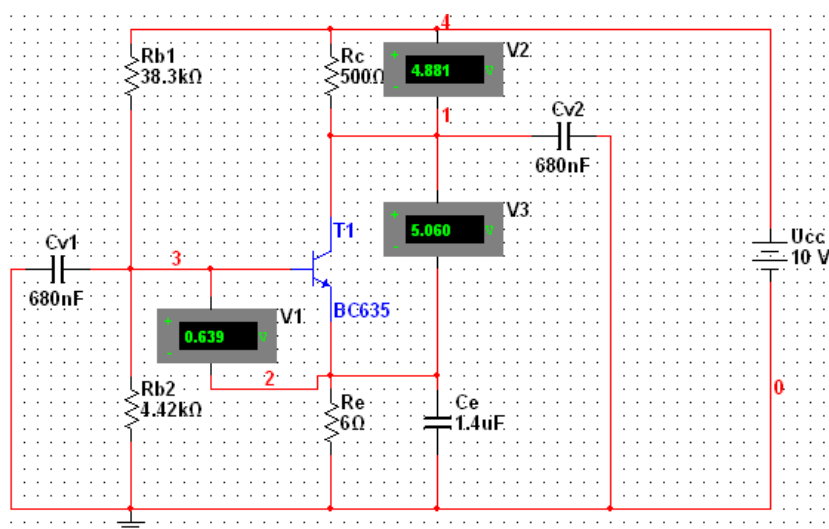
V simulaci používám tranzistor BC635, protože tranzistor typu BC489 nebyl v seznamu součástek. Tranzistor BC635 má podobné technické parametry jako BC489. Hodnoty součástek zůstaly stejné, pouze bylo nutné upravit odpor R_{B2} , aby se tranzistor otevřel a mohl protékat proud. Kondenzátory jsou zvoleny jako nejbližší dostupná hodnota k 666nF. Byla odečtena tato stejnosměrná napětí (Obr. 10.2.1).

$$U_{Rc} = 4,881V$$

$$U_{CE} = 5,06 V$$

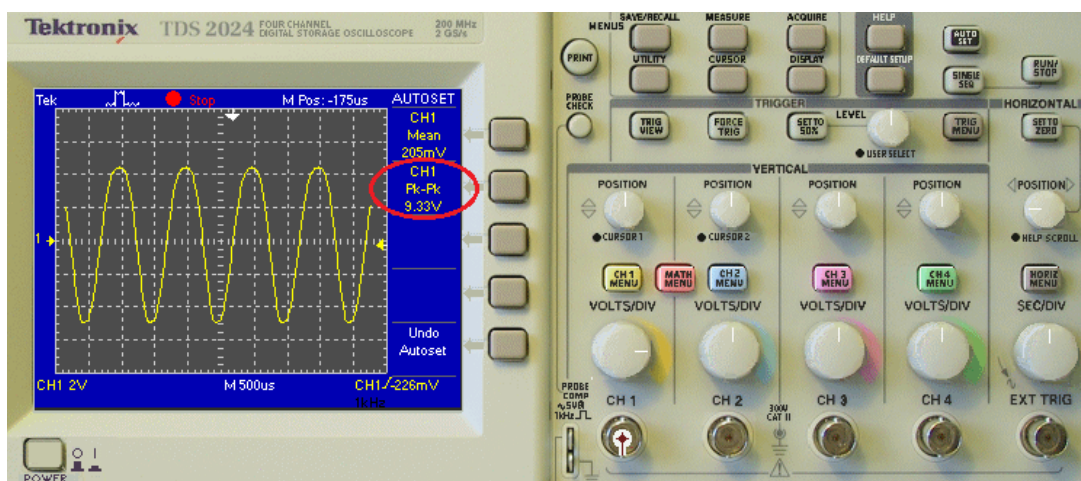
$$U_{BE} = 639mV$$

Pokud porovnáme teoretické předpoklady s výsledky v Multisimu, zjistíme, že i když byl použit jiný typ tranzistoru, tak obvod vykazoval správnou funkci. Napětí mezi kolektorem a emitorem se velmi přibližovalo ke zvolenému napětí v pracovním bodě $U_{CEP} = 5V$. Tranzistor měl podobné hybridní parametry jako tranzistor BC489.



Obr. 10.2.1: Ověření v simulačním programu Multisim

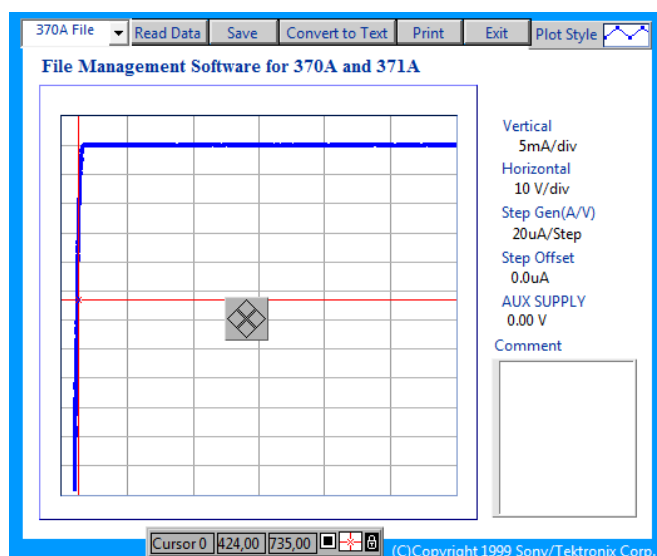
Program Multisim umožňuje připojit do obvodu různé měřicí přístroje, generátory apod. Využil jsem této možnosti a připojil na vstup zesilovače střídavý generátor a nastavil mu stejnou frekvenci a amplitudu jako u experimentálního ověření. Na výstup zesilovače byl připojen osciloskop Tektronix TDS2024 (Obr. 10.2.2). Po nastavení měření napětí „špička-špička“ byla odečtena hodnota napětí 9,33V. Výsledné zesílení je tedy 93.



Obr. 10.2.2: Výsledné zesílení v programu Multisim

11. Rozbor Zenerovy diody

Na obr. 11.1 je zobrazena voltampérová charakteristika Zenerovy diody 1N5370B v závěrném směru. U této Zenerovy diody dochází k průrazu vlivem lavinového jevu. Dojde k velkému nárůstu elektrického proudu, v jehož důsledku dochází k ostrému zlomu charakteristiky.



Obr. 11.1: Charakteristika Zenerovy diody zobrazená softwarem pro Tektronix 370A

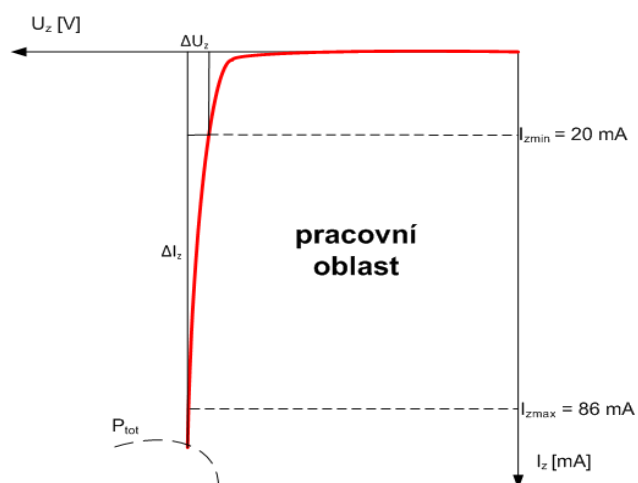
Horizontální rozlišení je 10V/dílek a vertikální 5mA/dílek. Abych mohl rozvinout charakteristiku na stínítku Tektronix 370A, musel jsem použít krokový generátor, který je nastaven na proudový krok generátoru 20 μ A. Pouhým okem je vidět, že Zenerovo napětí se pohybuje pod hranicí 60V. Pro přesnější určení používám kurzor, kterým jsem odečetl body této charakteristiky a zapsal do tabulky (Tab. 9.1). Maximální dovolený proud Zenerovou diodou jsem stanovil na 86mA. Do napětí 56,6V byly příslušné proudy velmi malé v řádech μ A. Nedaly se pomocí kurzoru přesně určit. Výrobce diody udává při napětí 42,2 V hodnotu proudu 0,5 μ A.

$U_z[V]$	$I_z[mA]$
10	desetiny μA
20	desetiny μA
30	desetiny μA
40	desetiny μA
50	desetiny μA
56,9	0,20
57,1	0,80
57,3	4,70
57,5	10,7
57,6	15,3
57,7	20,4
57,8	25,2
57,9	30,4
58	44,9
58,1	59,2
58,2	86,0

Tab. 11.1: Závěrný směr Zenerovy diody

Pracovní oblast je dána maximálním proudem Zenerovou diodou I_{zmax} a minimálním proudem I_{zmin} (Obr. 11.2). Podle dokumentace se Zenerovo napětí U_z pohybuje mezi 53,2 - 58,8V při minimálním proudu 20 mA. U Zenerovy diody 1N5370B je udávána maximální změna napětí ΔU_z asi do 1V. Ze změny napětí a proudu se stanoví dynamický odpor. Čím je hodnota dynamického odporu menší, tím méně se mění Zenerovo napětí při změně proudu. Dynamický nebo také diferenciální odpor není konstantní, ale mění se vlivem zakřivení voltampérové charakteristiky. Při malých proudech leží pracovní bod v blízkosti zlomu, kde je strmost menší a odpor r_z větší než jinde na charakteristice.

Dynamický odpor se uplatní při výpočtu činitele vyhlazení. Kvalita stabilizace je tedy vyšší, pokud je odpor r_z menší. Proto se v praxi klidový pracovní bod volí v části charakteristiky, kde je menší dynamický odpor. Dosáhneme tak lepší stabilizace, než když zvolíme pracovní bod hned za kolenem charakteristiky.



Obr. 11.2: Určení pracovní oblasti Zenerovy diody

$$I_{zmin} = 20 \text{ mA} \quad \Delta I_z = 66 \text{ mA}$$

$$I_{zmax} = 86 \text{ mA} \quad \Delta U_z = 0,5 \text{ V}$$

$$U_z = 57,7 \text{ V}$$

Dynamický odpor

$$r_z = \frac{\Delta U_z}{\Delta I_z} = \frac{0,5}{66 \cdot 10^{-3}} = 7,58 \Omega \quad (32)$$

Maximální ztrátový výkon Zenerovy diody

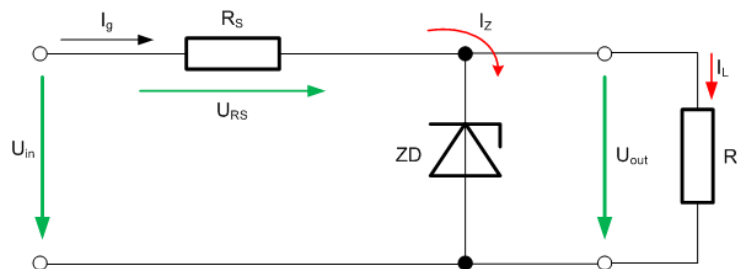
$$P_{tot} = U_{zmax} \cdot I_{zmax} = 58,2 \cdot 86 \cdot 10^{-3} = 5,0052 \text{ W} \quad (33)$$

Maximální dovolený proud Zenerovou diodou

$$I_{zmax} = \frac{P_{tot}}{U_{zmax}} = \frac{5,0052}{58,2} = 86 \text{ mA} \quad (34)$$

12. Návrh stabilizátoru napětí

Obr. 12. 1. zobrazuje základní zapojení pro stabilizaci stejnosměrného napětí. Stabilizátor pracuje tak, že při nepatrné změně vstupního napětí U_{in} nebo zatěžovacího proudu I_L zůstává výstupní napětí téměř konstantní. Je to způsobeno strmostí charakteristiky. Tomuto zapojení se říká parametrický stabilizátor napětí.

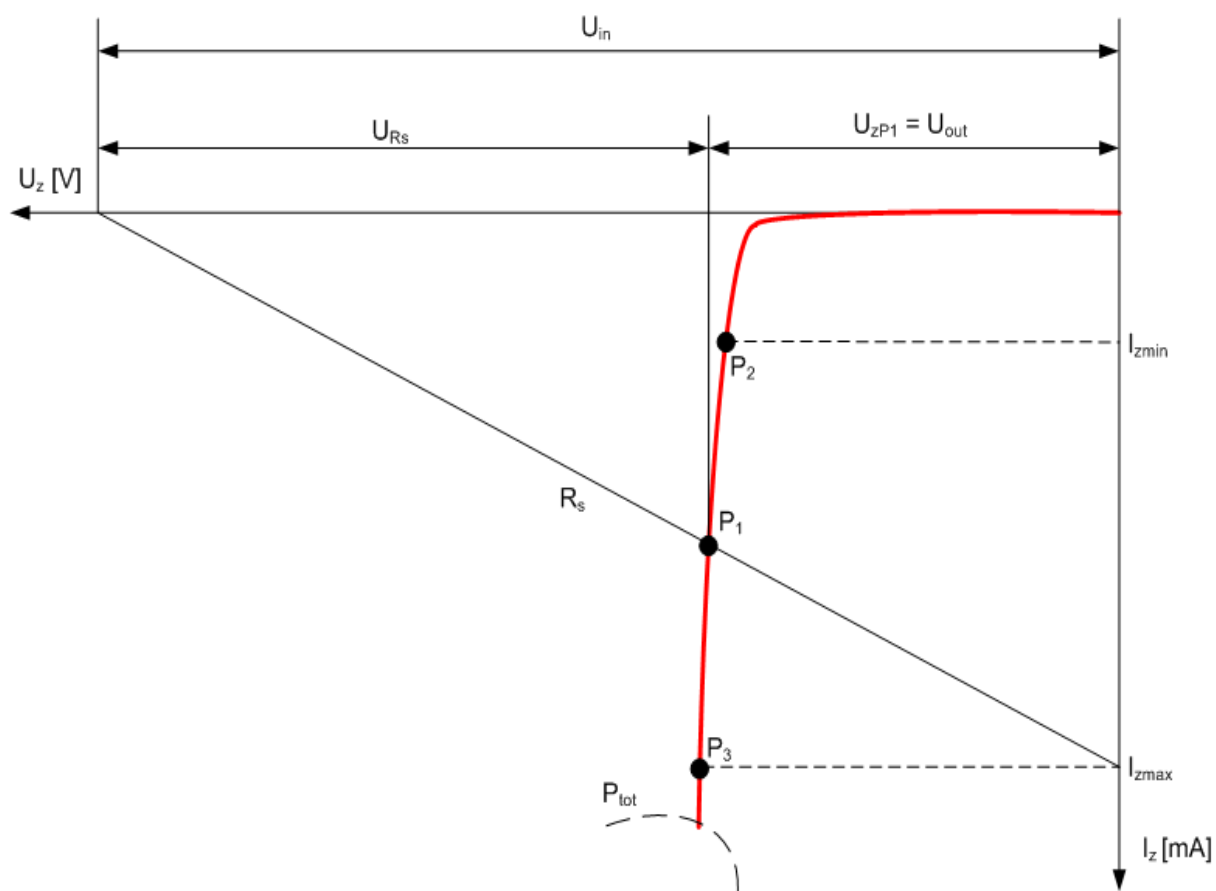


Obr. 12.1: Parametrický stabilizátor napětí se Zenerovou diodou

Na charakteristice volím pracovní bod P_1 , pro který provádím návrh stabilizátoru. Pracovní bod P_1 volím v části charakteristiky, kde se napětí téměř nemění. Pro určení vstupního napětí stabilizátoru volím grafickou metodu (Obr. 12.2). Vynesl jsem pracovní přímku R_S a odečetl hodnotu vstupního napětí U_{in} 140V. V praxi se volí vstupní napětí 2 až 4 krát větší než je výstupní napětí. Na výstupu stabilizátoru bude napětí U_{zP1} . Při kolísání vstupního napětí se bude pracovní bod přibližovat blíže k pracovnímu bodu P_2 nebo P_3 . Nikdy nesmí dojít k překročení těchto hranic. Došlo by ke zničení Zenerovy diody nebo by obvod nepracoval správně. Pracovní bod P_1 má souřadnice $U_{zP1} = 58V$ a $I_{zP1} = 51mA$.

Aby se pracovní bod Zenerovy diody neposunul ke zlomu charakteristiky, musíme dodržet tuto podmínku

$$I_{zmin} = 0,1. I_{zmax} = 0,1.86.10^{-3} = 8,6 \text{ mA} \leq 20\text{mA} \quad (35)$$



Obr. 12.2: Určení U_{in} , U_{out} , U_{Rs} pro pracovní bod P_1

$$U_{in} = 140V$$

$$U_{out} = 58V$$

$$U_{Rs} = U_{in} - U_{out} = 140 - 58 = 82V$$

Ztrátový výkon v pracovním bodě P_1

$$P_{tot P1} = U_{zP1} \cdot I_{zP1} = 58 \cdot 51 \cdot 10^{-3} = 2,958W \quad (36)$$

12.1. Stabilizátor bez zatěžovacího rezistoru R_L

$$R_S = \frac{U_{in} - U_{zP1}}{I_{zP1}} = \frac{140 - 58}{51 \cdot 10^{-3}} = 1607,8 \Omega \rightarrow 1,6 k\Omega \quad (37)$$

Výkonová ztráta na rezistoru je

$$P_{S1} = \frac{(U_{in} - U_{zP1})^2}{R_S} = \frac{(140 - 58)^2}{1620} = 4,15 W \rightarrow 5W \quad (38)$$

Rezistor volím z řady E24 jako nejbližší vyšší standardizovanou hodnotu s výkonovou ztrátou 5W.

Činitel vyhlazení

$$\varphi_s = 1 + \frac{R_S}{r_z} = 1 + \frac{1620}{7,58} = 214,7 \quad (39)$$

Činitel stabilizace

$$S = \varphi_s \cdot \frac{U_{out}}{U_{in}} = 214,7 \cdot \frac{58}{140} = 89 \quad (40)$$

Čím jsou činitelé S a φ_s větší, tím je účinnost stabilizace větší.

Poznámka: $I_g = I_{zP1} = 51 \text{ mA}$

12.2. Stabilizátor se zatěžovacím rezistorem R_L

$$R_s = \frac{U_{in} - U_{zP1}}{I_{zP1} + I_z} = \frac{140 - 58}{0,051 + 0,051} = 804\Omega \rightarrow 820\Omega \quad (41)$$

$$P_{S1} = \frac{(U_{in} - U_{zP1})^2}{R_s} = \frac{(140 - 58)^2}{806} = 8,34W \rightarrow 10W \quad (42)$$

Maximální proud do zátěže

$$I_{Lmax} = 0,9 \cdot I_{zmax} = 77,4mA \quad (43)$$

Minimální odpor zátěže R_L

$$R_{Lmin} = \frac{U_{out}}{I_{Lmax}} = \frac{58}{77,4 \cdot 10^{-3}} = 749,36\Omega \rightarrow 750\Omega \quad (44)$$

Činitel vyhlazení

$$\varphi_s = 1 + \frac{R_s}{r_z} = 1 + \frac{806}{7,58} = 107,3 \quad (45)$$

Činitel stabilizace

$$S = \varphi_s \cdot \frac{U_{out}}{U_{in}} = 107,3 \cdot \frac{58}{140} = 44,5 \quad (46)$$

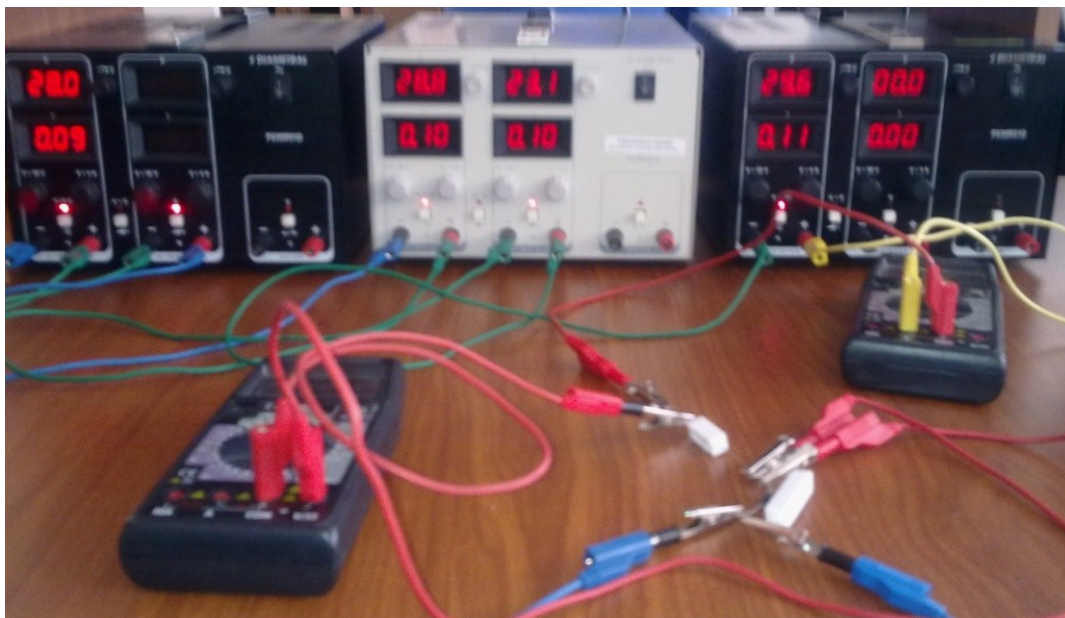
Poznámka: $I_g = I_{zP1} + I_L$

12.3. Experimentální ověření

Abych dosáhl potřebného vstupního napětí stabilizátoru 140 V, bylo nutné zapojit čtyři zdroje do série (Obr. 12.3.1). Pro ověření stabilizátoru bez zátěže jsem použil odpor 1,5 k Ω se ztrátovým výkonem 5W. Pro stabilizátor v zatíženém stavu odpor 820 Ω a odpor zátěže 1k Ω . Oba tyto odpory s maximální výkonovou ztrátou 10W. Ampérmetry a voltmetry byly změřeny stejnosměrné veličiny napětí a proudů (Tab. 12.3.1). Porovnání teoretických a praktických výsledků uvádím v závěru této práce.

Naměřené hodnoty		
	Se zatěžovacím odporem	Bez zatěžovacího odporu
I_g	63,2mA	119mA
U_{Rs}	73,5V	76,2V
U_{out}	63,5V	60,1V

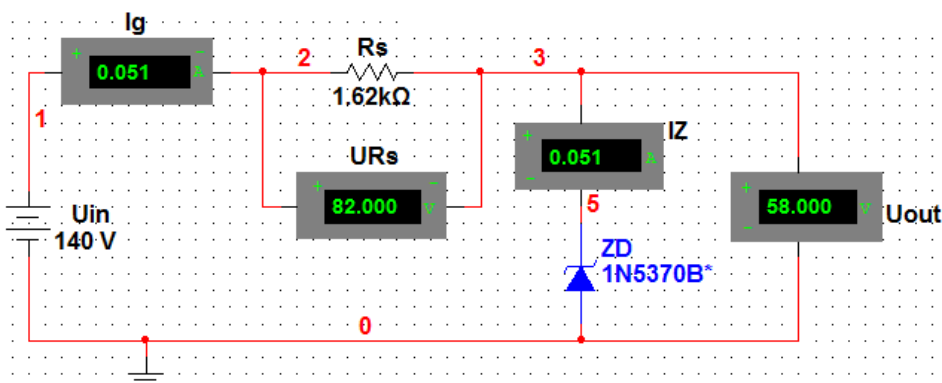
Tab. 12.3.1: Výsledky experimentálního ověření



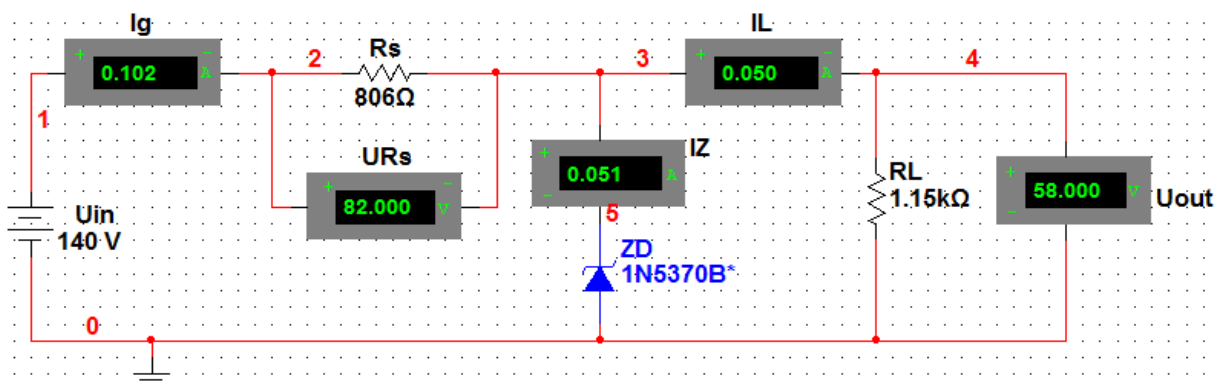
Obr. 12.3.1: Experimentální ověření stabilizátoru napětí

12.4. Ověření v programu Multisim

Nejprve jsem si v programu musel naeditovat Zenerovu diodu 1N5370B, protože nebyla dostupná v seznamu součástek. Obvod byl nejprve simulován bez připojení zátěže (Obr. 12.4.1). Do obvodu byly umístěny dva ampérmetry. Vstupní proud I_g se rovnal proudu, který protékal Zenerovou diodou. Výstupní napětí bylo shodné s napětím na Zenerově diodě pro zvolený pracovní bod. Na odporu R_s je opravdu rozdíl vstupního a výstupního napětí stabilizátoru. U zapojení se zátěží R_L , se vstupní proud I_g rovnal součtu proudů protékajících zátěží a Zenerovou diodou (Obr. 12.4.2). Bylo nutné tedy přidat jeden ampérmetr pro měření proudu do zátěže. Minimální odpor zátěže byl stanoven na $750\ \Omega$. Odpor do zátěže jsem experimentálně upravil na hodnotu $1,15\ \text{k}\Omega$. Tak bylo dosaženo co nejpřesnější stabilizace.



Obr. 12.4.1: Simulace bez zatěžovacího rezistoru R_L



Obr. 12.4.2: Simulace se zatěžovacím rezistorem R_L

13. Závěr

Úkolem mé bakalářské práce bylo naučit se pracovat s přístrojem pro snímání voltampérových charakteristik polovodičových součástek. Práce s analyzátozem 370A a jeho ovládání se podobalo ovládání běžného osciloskopu. Nevýhodou bylo ukládání výsledků na pružný disk. Modernější přístroje už využívají rozhraní USB 2.0 a jejich ovládání se provádí pomocí myši a klávesnice jako na počítači. Zdárným příkladem je analyzátor Agilent B1505A, jehož pořizovací cena je 554.000,-Kč.

První měřenou součástkou byl bipolární tranzistor BC489 typu NPN. Z voltampérových charakteristik jsem určil hybridní parametry, které jsem využil pro návrh jednostupňového střídavého zesilovače se společným emitorem. V katalogu se uvádí pouze statický proudový zesilovací činitel h_{21E} . U tranzistoru BC489 se proudový zesilovací činitel pohybuje od 60 do 400. Typická hodnota bývá okolo 200. Souhrn všech hybridních parametrů uvádím v tab. 13.1.

Parametr	Hodnota	Jednotka
h_{22e}	5	μS
h_{21E}	199,5	-
h_{11e}	1150	Ω
h_{12e}	0,0115	-

Tab. 13.1: Parametry bipolárního tranzistoru BC489

Experimentální odzkoušení proběhlo v laboratoři na RC stavebnici. Původní měřený tranzistor byl poškozen, proto jsem použil jiný. Ten sice byl stejného typu, ale měl rozdílné parametry. To se projevilo na funkci zesilovače. Nezesiloval vstupní střídavý signál 86 krát, ale pouze 50 krát. RC stavebnice měla limitované řady součástek, proto byl například odpor R_E sestaven jako paralelní kombinace dvou 10Ω odporů. Pomocí voltmetru jsem odečetl stejnosměrná napětí kolektor - emitor, báze - emitor a napětí na odporu R_c . (Tab. 13.2).

Napětí	Praktické výsledky	Teoretické předpoklady	Jednotka
U_{Rc}	4,830	5	V
U_{CE}	4,862	5	V
U_{BE}	664,1	0,307	mV

Tab. 13.2: Porovnání stejnosměrných napětí zesilovače

Druhou měřenou polovodičovou součástkou byla Zenerova dioda s označením 1N5370B. U praktických výsledků se projevil nežádoucí vliv teploty a omezená dostupnost součástek. Obecně platí, že s rostoucí teplotou se posouvá hranice Zenerova napětí. Nejprve jsem obvod realizoval bez zatěžovacího odporu, čili zatěžovací odpor $R_L \rightarrow \infty$. Rezistor s odporem $1,62\text{k}\Omega$ měl výkonovou ztrátu $4,15\text{ W}$. Z řady E24 jsem zakoupil nejbližší hodnotu součástky $1,5\text{k}\Omega$ s výkonovou ztrátou 5 W . Maximální výkonová ztráta se zvětšila na $4,48\text{ W}$. Součástka se hodně zahřívala, což je nežádoucí. Obdobně tomu bylo u zapojení se zatěžovacím odporem. Srovnání teoretických a praktických výsledků uvádím v tab. 13.3.

Teoretické předpoklady		
	$R_L \rightarrow \infty$	$R_L = 1\text{k}\Omega$
I_g	51mA	102mA
U_{Rs}	82V	82V
U_{out}	58V	58V
Praktické výsledky		
	$R_L \rightarrow \infty$	$R_L = 1\text{k}\Omega$
I_g	63,2mA	119mA
U_{Rs}	73,5V	76,2V
U_{out}	63,5V	60,1V

Tab. 13.3: Porovnání praktických výsledků s teoretickými předpoklady

Pokud bychom chtěli obvody použít v praxi, musíme počítat se zatěžovacím odporem, protože výstupem je nějaké reálné zařízení. Musíme volit pracovní bod tak, aby součástky z řady E24 nebo E12 se co nejvíce přibližovaly k výpočtům. Oba obvody jsem si navíc simuloval v programu Multisim. V simulaci nebyl znatelný vliv teploty, proto stabilizátor pracoval naprosto správně podle teoretických předpokladů.

14. Literatura

- [1] NOBILIS, Jiří, Vlastislav KAZDA a Jiří KOPELENT. *Elektronika: polovodičové součástky a základní zapojení*. Praha 6: BEN, 2006. ISBN 80-7300-123-3.
- [2] MAŤÁTKO, Jan. *Elektronika pre 2. a 3. ročníky SPŠ elektrotechnických*. Bratislava: Alfa, 1987. ISBN 80-05-01182-2.
- [3] KESL, Jan. *Elektronika 1: analogová technika*. Praha 10: BEN, 2003. ISBN 80-7300-074-1.
- [4] VOBECKÝ, Jan a Vít ZÁHLAVA. *Elektronika: Součástky a obvody, principy a příklady*. Praha: Grada, 2001. ISBN 80-247-1241-5.
- [5] SCHOMMERS, Adrian. *Elektronika tajemství zbavená: Pokusy se stejnosměrným proudem*. Ostrava: HEL, 1988. ISBN 80-902059-9-2.
- [6] MALÝ, Zdeněk a Mojmír SIMERSKÝ. *Elektrotechnologie 1*. Praha: SNTL, 1990. ISBN 80-03-00354-7.
- [7] Varistor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-04-27]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Varistor>
- [8] Praktická elektronika/Diody. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-04-30]. Dostupné z: http://cs.wikibooks.org/wiki/Praktick%C3%A1_elektronika/Diody
- [9] Stabilizátor napětí. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Stabiliz%C3%A1tor_nap%C4%9Bt%C3%AD